

vek21.penzgtu.ru

18+

ISSN 2221-951X

XXI век : ИТОГИ ПРОШЛОГО И ПРОБЛЕМЫ НАСТОЯЩЕГО

пнчос



2021
№ 4(56) Т. 10



технические науки



XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего *плюс*

Учредитель – ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

Главный редактор

Шеуджен Асхад Хазретович, академик Российской академии наук,
доктор биологических наук, профессор

Заместители главного редактора:

Авроров Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент
Ефремова Сания Юнусовна, доктор биологических наук, профессор
Мотовилов Олег Константинович, доктор технических наук, доцент
Пашенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор
Политаева Наталья Анатольевна, доктор технических наук, профессор
Чулков Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент

Редакционная коллегия:

Акинин Николай Иванович, доктор технических наук, профессор
Андреев Юрий Александрович, доктор технических наук
Антипов Сергей Тихонович, доктор технических наук, профессор
Базарнова Юлия Генриховна, доктор технических наук, профессор
Богданов Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор
Бурахта Вера Алексеевна, доктор химических наук, профессор
Васенев Иван Иванович, доктор биологических наук, профессор
Васильев Андрей Витальевич, доктор технических наук, профессор
Голуб Ольга Валентиновна, доктор технических наук, профессор
Громов Юрий Юрьевич, доктор технических наук, профессор
Давыденко Наталия Ивановна, доктор технических наук, доцент
Дмитриев Михаил Сергеевич, доктор технических наук, доцент
Зинкин Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент
Квятковская Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор
Косников Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор
Кручинина Наталия Евгеньевна, доктор технических наук, профессор
Мамедова Тарана Аслан кызы, доктор технических наук, профессор
Маскевич Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор
Махмудова Любовь Ширваниевна, доктор технических наук, профессор
Михеев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор
Первухина Елена Львовна, доктор технических наук, профессор
Петрова Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор
Прохоров Сергей Антонович, доктор технических наук, профессор
Рыбаков Анатолий Валерьевич, доктор технических наук, профессор
Стороженко Павел Аркадьевич, член-корреспондент Российской академии наук,
доктор химических наук, профессор
Таранцева Клара Рустемовна, доктор технических наук, профессор
Тихомирова Елена Ивановна, доктор биологических наук, профессор
Фатыхов Юрий Адгамович, доктор технических наук, профессор
Шалагин Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент
Ципенко Антон Владимирович, доктор технических наук, доцент
Школьникова Марина Николаевна, доктор технических наук, доцент

Ответственный секретарь

Коростелева Анна Владимировна, кандидат технических наук

© ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», 2021

Основан в 2011 г.

18+

Том 10
№ 4 (56)
2021

Журнал выходит
4 раза в год

Входит в ПЕРЕЧЕНЬ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Зарегистрирован Управлением Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций по Пензенской области ПИ № ТУ 58 – 00243 от 27 апреля 2015 года.

Компьютерная верстка:
В.В. Зупарова

Технический редактор:
В.В. Зупарова

Адрес редколлегии, учредителя,
редакции и издателя
ФГБОУ ВО «Пензенский
государственный технологический
университет»:
440039, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, д. 1а/11
Тел.: 8(8412) 20-86-39;
E-mail: journal21@penzgtu.ru;
Сайт: <https://vek21.penzgtu.ru>

Подписано в печать 13.12.2021.
Выход в свет 22.12.2021.
Формат 60X84 1/8
Печать ризография.
Усл. печ. л. 23,2.
Тираж 100 экз. Заказ № 182.

Отпечатано в ПензГТУ,
440039, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, д. 1а/11, тел.: 8(8412) 20-86-39
Цена свободная

СВЕДЕНИЯ О ЧЛЕНАХ РЕДКОЛЛЕГИИ

Главный редактор

Шеуджен Асхад Хазретович, академик Российской академии наук, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой агрохимии
(Кубанский государственный аграрный университет)

Заместители главного редактора:

Авроров Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Пищевые производства»

(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Ефремова Сания Юнусовна, доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры «Биотехнология и техносферная безопасность»

(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Мотовилов Олег Константинович, доктор технических наук, доцент, руководитель

(Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск, Россия)

Пашенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, ректор

(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Политаева Наталья Анатольевна, доктор технических наук, профессор,

профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия)

Чулков Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент,

заведующий кафедрой «Биомедицинская инженерия»

(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Редакционная коллегия:

Акинин Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность»

(Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

Андреев Юрий Александрович, доктор технических наук,

профессор кафедры «Пожарная безопасность» (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия)

Антипов Сергей Тихонович, доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств»

(Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия)

Базарнова Юлия Генриховна, доктор технических наук, профессор,

директор Высшей школы биотехнологии и пищевых технологий

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия)

Богданов Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент,

профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» (Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия)

Бурахта Вера Алексеевна, доктор химических наук, профессор, проректор по научной работе

(Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, г. Уральск, Республика Казахстан)

Васенев Иван Иванович, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экология»

(РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия)

Васильев Андрей Витальевич, доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой «Химическая технология и промышленная экология»

(Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия)

Голуб Ольга Валентиновна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела научных направлений исследований комплексной переработки сельскохозяйственного сырья СибНИТИП

(Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, п. Краснообск, Новосибирская обл., Россия)

Громов Юрий Юрьевич, доктор технических наук, профессор,

директор института автоматизации и информационных технологий

(Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия)

Давыденко Наталия Ивановна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология и организация общественного питания», начальник отдела подготовки научных кадров

(Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия)

Дмитриев Михаил Сергеевич, доктор технических наук, доцент,

профессор кафедры автомобильного транспорта, информационных технологий и методики обучения техническим дисциплинам

(Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет)

Зинкин Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент,

профессор кафедры «Вычислительная техника»

(Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия)

Квятковская Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор,
проректор по учебной работе, заведующий кафедрой «Высшая и прикладная математика»
(Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия)

Косников Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы»
(Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия)

Кручинина Наталия Евгеньевна, доктор технических наук, профессор,
декан факультета биотехнологии и промышленной экологии, заведующий кафедрой «Промышленная экология»
(Российский государственный химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

Маммадова Тарана Аслан кызы, доктор технических наук, профессор, заместитель директора
(Институт Нефтехимических процессов НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан)

Маскевич Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, директор *(Международный государственный экологический институт им.А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета, г.Минск, Республика Беларусь)*

Махмудова Любовь Ширваниевна, доктор технических наук, профессор, директор
(Институт нефти и газа, Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, г.Грозный, Чеченская Республика)

Михеев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы»
(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Петрова Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и моделирования»
(Астраханский инженерно-строительный институт, г. Астрахань, Россия)

Прохоров Сергей Антонович, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии»
(Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, г. Самара, Россия)

Рыбаков Анатолий Валерьевич, доктор технических наук, профессор, начальник научно-исследовательского центра Академия гражданской защиты
(Академия гражданской защиты МЧС России, г. Москва, Россия)

Стороженко Павел Аркадьевич, член-корреспондент Российской академии наук, доктор химических наук,
профессор, управляющий директор ГНЦ РФ «Государственный ордена Трудового Красного Знамени НИИ химии и технологии элементоорганических соединений», профессор кафедры химии и технологии элементоорганических соединений
(Московский институт тонкой химической технологии имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия)

Таранцева Клара Рустемовна, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Биотехнология и техносферная безопасность»
(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Тихомирова Елена Ивановна, доктор биологических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Экология и техносферная безопасность»
(Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Россия)

Фатыхов Юрий Адгамович, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Пищевых и холодильных машин»
(Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия)

Шалагин Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Компьютерные системы»
(Казанский Национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, г. Казань, Россия)

Ципенко Антон Владимирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Физика»
(Московский авиационный институт, г. Москва, Россия)

Школьникова Марина Николаевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры биотехнологии
(Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Бийск, Россия)

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ	
Бусыгин Сергей Валерьевич, Ковальногов Владислав Николаевич, Чукалин Андрей Валентинович.....	12
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНОМ ТРЕХМЕРНОМ ЭЛЕКТРОДЕ	
Гвоздева Ирина Геннадьевна, Кошев Александр Николаевич, Варенцов Валерий Константинович, Кузина Валентина Владимировна.....	16
МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ОБУЧАЮЩЕГО АЛГОРИТМА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	
Зоткина Алена Александровна, Мартышкин Алексей Иванович, Новоселова Ольга Викторовна.....	21
КОНЦЕПЦИЯ УДАЛЕННОГО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО КОМПЬЮТЕРНЫМ ДИСЦИПЛИНАМ	
Смольянов Андрей Григорьевич, Куляшова Наталья Михайловна.....	25
ОСОБЕННОСТИ ВОСПРИЯТИЯ ЛЁТЧИКАМИ ИНФОРМАЦИИ ОТ ИМИТАТОРОВ АВИАЦИОННОГО ТРЕНАЖЁРА ПРИ РЕШЕНИИ НАВИГАЦИОННЫХ ЗАДАЧ	
Роганов Владимир Робертович.....	30
АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ В РЕЗУЛЬТАТАХ ПОИСКОВОЙ ВЫБОРКИ	
Шевнина Юлия Сергеевна, Томишинец Александр Михайлович.....	35
ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ И РАЗРЕШИМОСТИ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ПРОТОЧНОМ ТРЕХМЕРНОМ ЭЛЕКТРОДЕ	
Гвоздева Ирина Геннадьевна, Кошев Александр Николаевич, Варенцов Валерий Константинович, Кузина Валентина Владимировна.....	39
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЕРИФИКАЦИИ БЛОЧНО-СИНХРОННЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, ПОСТРОЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ <i>BIGDATA</i>	
Синев Михаил Петрович, Трокоз Дмитрий Анатольевич, Мартышкин Алексей Иванович.....	44
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МОДЕЛИ СИСТЕМЫ СТИМУЛИРОВАНИЯ ППС В ВУЗЕ	
Никулин Павел Андреевич.....	49
ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИМИТАТОРА ТЕПЛОВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ТРЕНАЖЁРА	
Роганов Владимир Робертович, Есимова Нурзипа Сапаровна, Пышкина Ирина Сергеевна, Кувшинова Ольга Александровна.....	54
РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРОЦЕССА СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ	
Ерженин Роман Валерьевич.....	60
МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ	
Маркин Евгений Игоревич.....	65

АЛГЕБРАИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ПОРАХ ПРОТОЧНОГО ТРЕХМЕРНОГО ЭЛЕКТРОДА ИЗ УГЛЕГРАФИТОВОГО ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА	
Кузина Валентина Владимировна, Гвоздева Ирина Геннадьевна, Кошев Александр Николаевич, Варенцов Валерий Константинович.....	69
ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БИНАРНЫХ И СМЕШАННЫХ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ	
Зеленков Геннадий Анатольевич, Данцевич Игорь Михайлович, Мышкина Алена Николаевна.....	73
АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СОВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ	
Синев Михаил Петрович, Мартышкин Алексей Иванович.....	77
ОБЗОР ПРОТОКОЛОВ И СТАНДАРТОВ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ	
Зикирбай Куаныш, Михайлов Петр Григорьевич, Бактыбаев Мурат Кыргызбаевич.....	82
РАЗРАБОТКА ШИНЫ ITBUS ПОВЫШЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ НА ФИЗИЧЕСКОМ УРОВНЕ	
Трубицков Сергей Владимирович, Ремонтов Андрей Петрович.....	86
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВИРТУАЛЬНОМ ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ	
Обухов Артем Дмитриевич, Майстренко Наталья Владимировна, Патутин Кирилл Игоревич, Вехтева Надежда Андреевна.....	90
КОНТРОЛЬ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТУРБОАГРЕГАТОВ	
Иванова Яна Александровна.....	94
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ЧИСЛЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПРОИЗВОДНОЙ НЕСЛОЖНОЙ ФУНКЦИИ	
Соколова Александра Алексеевна.....	98
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЧАСТОТНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ	
Ворох Дмитрий Александрович.....	102
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ДИСКРЕТНО-ФАЗОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ	
Данилин Сергей Александрович.....	108
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НИТЕЙ КОНЕЧНОЙ ЖЕСТКОСТИ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	
Тарасов Денис Александрович, Волков Владимир Васильевич, Аксенова Елена Александровна.....	113

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ

ВЛИЯНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ПИВА НА ФОРМИРОВАНИЕ ЦВЕТА	
Грибкова Ирина Николаевна, Елисеев Михаил Николаевич.....	117
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПРЕССИРОВАННЫХ ТОМАТОВ ЧЕРРИ С КЛУБНИЧНЫМ ПЮРЕ	
Макарова Надежда Викторовна, Воронина Марианна Сергеевна, Гуляева Алена Николаевна, Шишкова Александра Валерьевна.....	123

ПОЛУЧЕНИЕ ЭКСТРАКТА ИЗ КОРНЕЙ <i>CODONOPSIS JAVANICA (BLUME)</i> <i>HOOK.F. & THOMSON</i>, ПРОИЗРАСТАЮЩЕГО В РАЙОНЕ ТАУЖАНГА, ВЬЕТНАМ Табакаева Оксана Вацлавовна, Буй Зань Чунг, Чан Дык Куан.....	127
СКРИНИНГ ДРОЖЖЕВЫХ КУЛЬТУР КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПРОДУЦЕНТОВ ПОЛНОЦЕННОГО БЕЛКА НА ОТХОДАХ МАСЛИЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА Фоменко Иван Андреевич, Мижева Айслю Альбертовна.....	132
РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ И ТЕХНОЛОГИИ МАФФИНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНУЛИНА И ЧЕРЕШКОВ СЕЛЬДЕРЕЯ Копылова Анастасия Валерьевна, Сапожников Александр Николаевич, Давыденко Наталия Ивановна.....	138
АНАЛИЗ БАЗЫ ПАТЕНТОВ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ ПРОДУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЫРЬЯ РАСТЕНИЯ РОДА БОЯРЫШНИК Сагингалиева Аяжан Галиевна, Гумаров Гали Сагингалиевич, Коновалов Владимир Викторович, Машанова Нурбиби Советовна.....	143
ПОТЕНЦИАЛ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ РЕЧНЫХ РАКОВ КАК СЫРЬЯ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СОУСОВ Муханова Мария Александровна, Якубова Олеся Сергеевна.....	150
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕЛАНИНА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОСТАВЕ КАКАОСОДЕРЖАЩИХ КОНДИТЕРСКИХ ГЛАЗУРЕЙ Кадрицкая Елена Александровна, Школьникова Марина Николаевна.....	155
<i>БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА</i>	
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЦЕНАРИЕВ АВАРИЙ С ОБРАЗОВАНИЕМ ОГНЕННОГО ШАРА Пермяков Владимир Николаевич, Мартынович Владимир Леонидович, Хайруллина Лариса Батыевна.....	160
СПОСОБ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА СИГНАЛА В СИСТЕМАХ ДИНАМИЧЕСКОГО РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ НА ТРАНСПОРТЕ Юданов Петр Максимович.....	164
ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ТРУДОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МАШИНИСТА МЕТРОПОЛИТЕНА Нарусова Елена Юрьевна, Стручалин Владимир Гайозович, Ковусов Азим Байрамович, Травкина Ангелина Евгеньевна.....	168
ПОЛИГОН «УМНЫЙ ТРУД» КАК ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ ПРОСТРАНСТВО ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИЧНОСТИ БЕЗОПАСНОГО ТИПА ПОВЕДЕНИЯ Гончарук Татьяна Николаевна, Субботина Надежда Андреевна, Нам Галина Евгеньевна.....	173
ОЦЕНКА РИСКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА РАБОТНИКОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ Муллер Нина Васильевна, Младова Татьяна Александровна.....	178
УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЗАСЫПАНИЯ ВОДИТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ Богданов Андрей Владимирович, Астафьева Галина Александровна.....	183
МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ОГNETУШАЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МОДУЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА Пустовалов Илья Андреевич, Иванов Алексей Владимирович.....	187

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА ПРИ УКЛАДКЕ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД Донцов Сергей Александрович.....	193
СНИЖЕНИЕ ВЕЛИЧИН ПОЖАРНОГО РИСКА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ Мифтахутдинова Александра Артуровна, Иванов Алексей Владимирович, Маслаков Михаил Дмитриевич.....	197
МЕТОДИКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ Алексеев Дмитрий Владимирович.....	202
ТЕХНОГЕННЫЙ ФАКТОР ПРИ ОЦЕНКЕ РИСКА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ Сергеева Маргарита Дмитриевна.....	206
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМ ЛЮДЕЙ С НАРУШЕНИЯМИ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА Золкин Алексей Николаевич, Павлов Андрей Иванович, Чуфистов Олег Евгеньевич.....	211
НОРМАТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОНЯТИЯ ПЕРВОЙ ПОМОЩИ НА ТЕХНОСФЕРНЫХ ПРОИСШЕСТВИЯХ Рева Юрий Викторович, Трегубов Павел Олегович.....	215
ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ ОТ СОЛЕЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ Демидов Артем Андреевич, Пашинин Валерий Алексеевич, Полянскова Екатерина Александровна, Панфилова Ирина Сергеевна, Зупарова Валентина Владимировна.....	220

CONTENT
INFORMATION SCIENCE, COMPUTING DEVICES AND CONTROLLING

MATHEMATICAL SIMULATION AND EFFICIENCY INVESTIGATION RECIRCULATION OF FLUE GASES OF A POWER-GENERATING BOILER Busygin Sergey Valerievich, Kovalnogov Vladislav Nikolaevich, Chukalin Andrey Valentinovich.....	12
MATHEMATICAL AND NUMERICAL SIMULATION OF ELECTROCHEMICAL PROCESSES IN A THREE-DIMENSIONAL FLOW ELECTRODE Gvozdeva Irina Gennadievna, Koshev Alexander Nikolaevich, Varentsov Valery Konstantinovich, Kuzina Valentina Vladimirovna.....	16
TECHNIQUE FOR OPTIMIZING THE LEARNING ALGORITHM OF NEURAL NETWORKS Zotkina Alena Aleksandrovna, Martyshkin Alexey Ivanovich, Novoselova Ol'ga Viktorovna.....	21
THE CONCEPT OF A REMOTE LABORATORY PRACTICE ON COMPUTER DISCIPLINES Smolyanov Andrey Grigorievich, Kulyashova Natalia Mikhailovna.....	25
FEATURES OF PERCEPTION WITH RATERS OF INFORMATION FROM SIMULATORS OF THE AVIATION SIMULATOR WHEN SOLVING NAVIGATION PROBLEMS Roganov Vladimir Robertovich.....	30
AUTOMATION OF SEMANTIC ANALYSIS OF INFORMATION IN NATURAL LANGUAGE AS RESULTS OF SEARCH SAMPLING Shevnina Yulia Sergeevna, Tomishinets Alexander Mikhailovich.....	35
PROBLEMS OF STABILITY AND SOLVABILITY IN MATHEMATICAL MODELING OF THE DISTRIBUTION OF AN ELECTROCHEMICAL PROCESS IN A FLOWING THREE-DIMENSIONAL ELECTRODE Gvozdeva Irina Gennadievna, Koshev Alexander Nikolaevich, Varentsov Valery Konstantinovich, Kuzina Valentina Vladimirovna.....	39
THEORETICAL ASPECTS OF VERIFICATION OF BLOCK-SYNCHRONOUS PARALLEL PROGRAMS FOR COMPUTING SYSTEMS BUILT USING BIGDATA TECHNOLOGY Sinev Mihail Petrovich, Trokoz Dmitriy Anatolevich, Martyshkin Alexey Ivanovich.....	44
STATEMENT OF CONTROL PROBLEMS APPLICABLE TO THE MODEL OF THE STIMULATION SYSTEM FOR TEACHERS IN THE UNIVERSITY Nikulin Pavel Andreevich.....	49
FEATURES OF SIMULATION OF THE SIMULATOR OF THE THERMAL IMAGE OF THE AVIATION SIMULATOR Roganov Vladimir Robertovich, Esimova Nurzipa Saparovna, Pyshkina Irina Sergeevna, Kuvshinova Olga Aleksandrovna.....	54
DEVELOPMENT OF A METHODOLOGICAL APPARATUS FOR THE PROCESS OF STRATEGIC MANAGEMENT OF THE DEVELOPMENT OF THE STATE INFORMATION SYSTEM Erzhenin Roman Valerievich.....	60
IMAGE PREPROCESSING METHODS IN PERSONAL IDENTIFICATION SYSTEMS Markin Evgeniy Igorevich.....	65
ALGEBRAIC MODEL FOR CALCULATION OF THE ELECTROCHEMICAL PROCESS IN THE PORES OF A THREE-DIMENSIONAL FLOW ELECTRODE FROM A CARBON FIBER MATERIAL Kuzina Valentina Vladimirovna, Gvozdeva Irina Gennadievna, Koshev Alexander Nikolaevich, Varentsov Valery Konstantinovich.....	69

ESTIMATION OF THE ACCURACY OF MEASURING THERMAL CONDUCTIVITY OF BINARY AND MIXED ELECTROLYTE SOLUTIONS Zelenkov Gennady Anatolyevich, Dantsevich Igor Mikhailovich, Myshkina Alena Nikolaevna.....	73
HARDWARE IMPLEMENTATION AND RESEARCH OF SOME MODERN ALGORITHMS FOR PLANNING REAL-TIME OPERATING SYSTEMS Sinev Mihail Petrovich, Martyshkin Alexey Ivanovich.....	77
OVERVIEW OF PROTOCOLS AND STANDARDS FOR INTERNET SENSORS Zikirbai Kuanysh, Mikhailov Pyotr Grigoryevich, Baktybaev Marat Kyrgyzbaevich.....	82
CALCULATION OF THE <i>ITBUS</i> BUS BANDWIDTH AT THE PHYSICAL LEVEL Trubitskov Sergey Vladimirovich, Remontov Andey Petrovich.....	86
MATHEMATICAL MODELING AND VISUALIZATION OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN A VIRTUAL LABORATORY STAND Obukhov Artem Dmitrievich, Maystrenko Natalia Vladimirovna, Patutin Kirill Igorevich, Vekhteva Nadezhda Andreevna.....	90
TORSIONAL VIBRATION CONTROL OF ROTATING ELEMENTS OF TURBINE UNITS Ivanova Yana Aleksandrovna.....	94
THE RESEARCH OF THE NUMERICAL FILTERING METHOD BY EXAMPLE CALCULATING THE VALUES OF THE DERIVATIVE OF A SIMPLE FUNCTION Sokolova Alexandra Alekseevna.....	98
DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE EDDY CURRENT PROBES WITH FREQUENCY SCANNING Vorokh Dmitry Aleksandrovich.....	102
A MATHEMATICAL MODEL OF THE OPERATION OF AN OPTOELECTRONIC DISCRETE-PHASE CONVERTER FOR AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF THE GEOMETRY OF THE SURFACE OF THE BLADES OF A GAS TURBINE ENGINE Danilin Sergey Alexandrovich.....	108
MATHEMATICAL MODELING OF THE OPERATION OF BENDED RIGID THREADS UNDER IMPACT Tarasov Denis Aleksandrovich, Volkov Vladimir Vasilievich, Aksenova Elena Aleksandrovna.....	113
<i>FOOD TECHNOLOGY</i>	
THE BEER COMPOUNDS INFLUENCE ON COLOR FORMATION Gribkova Irina Nikolaevna, Eliseev Michail Nikolaevich.....	117
RESEARCH OF PHYSICO-CHEMICAL AND ORGANOLEPTIC PROPERTIES OF COMPRESSED CHERRY TOMATOES WITH STRAWBERRY PUREE Makarova Nadezhda Viktorovna, Voronina Marianna Sergeevna, Gulyaeva Alena Nikolaevna, Shishkova Alexandra Valerievna.....	123
OBTAINING AN EXTRACT FROM THE ROOTS OF <i>CODONOPSIS JAVANICA (BLUME) HOOK.F. & THOMSON</i>, GROWING IN THE AREA OF TAUJANG, VIETNAM Tabakaeva Oksana Vatslavovna, Bui Zan Chung, Chan Duc Kuan.....	127
SCREENING OF YEAST CROPS AS POTENTIAL PRODUCERS OF COMPLETE PROTEIN ON OIL PRODUCTION WASTE Fomenko Ivan Andreevich, Mizheva Aislu Albertovna.....	132

DEVELOPMENT OF FORMULATION AND PRODUCTION TECHNOLOGY OF MUFFINS WITH THE USE OF INULIN AND CELERY STALKS Kopylova Anastasiia Valer'evna, Sapozhnikov Aleksandr Nikolayevich, Davydenko Natalia Ivanovna.....	138
ANALYSIS OF THE DATABASE OF PATENTS FOR INVENTIONS OF PRODUCTS USING RAW MATERIALS OF THE HAWTHORN PLANT GENUS Sagingalieva Ayazhan Galieva, Gumarov Gali Sagingalievich, Konovalov Vladimir Viktorovich, Mashanova Nurbibi Sovetovna.....	143
SECONDARY RESOURCES POTENTIAL OF RIVER CRANKS AS RAW MATERIALS FOR MAKING SAUCE Mukhanova Maria Alexandrovna, Yakubova Olesya Sergeevna.....	150
INVESTIGATION OF THE TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF MELANIN FOR USE IN THE COMPOSITION OF COCOA-CONTAINING CONFECTIONERY GLAZES Kadritskaya Elena Alexandrovna, Shkolnikova Marina Nikolaevna.....	155
<i>HUMAN ACTIVITY SAFERY</i>	
THERMODYNAMIC MODEL OF FIREBALL ACCIDENT SCENARIOS Permyakov Vladimir Nikolaevich, Martynovich Vladimir Leonidovich, Khayrullina Larisa Batyevna.....	160
A FAST METHOD FOR SIMULATING RADIATION MAP BY INTERPOLATION IN A VIRTUAL ENVIRONMENT Yudanov Petr Maksimovich.....	164
PSYCHOEMOTIONAL ASPECTS OF EMPLOYMENT OF THE SUBWAY TRAIN DRIVER Narusova Elena Yurievna, Struchalin Vladimir Gaiozovich, Kovusov Azim Bayramovich, Travkina Angelina Evgenievna.....	168
POLYGON "SMART LABOR" AS A PROFESSIONAL AND EDUCATIONAL SPACE FOR THE FORMATION OF A SAFE TYPE OF BEHAVIOR PERSONALITY Goncharuk Tatiana Nikolaevna, Subbotina Nadezhda Andreevna, Nam Galina Evgenievna.....	173
THE ASSESSMENT OF THE RISK OF OCCUPATIONAL INJURIES OF WORKERS ON THE RAILWAY Muller Nina Vasilevna, Mladova Tatiana Aleksandrovna.....	178
DEVICE FOR ANTI-SLOPING THE DRIVER OF THE VEHICLE Bogdanov Andrey Vladimirovich, Astafieva Galina Aleksandrovna.....	183
METHOD FOR INCREASING THE FIRE EXTINGUISHING EFFICIENCY OF MODULES AUTOMATIC FIRE WATER MIST SPRAY EXTINGUISHERS SYSTEMS AT THE OBJECTS OF THE OIL AND GAS FACILITIES Pustovalov Ilya Andreevich, Ivanov Alexey Vladimirovich.....	187
INTEGRAL ASSESSMENT OF PERSONNEL SAFETY WHEN LAYING NON-RIGID ROADWEAR Dontsov Sergey Alexandrovich.....	193
REDUCING FIRE RISKS WHEN TRANSPORTING PETROLEUM PRODUCTS Miftakhutdinova Aleksandra Arturovna, Ivanov Aleksey Vladimirovich, Maslakov Mikhail Dmitrievich.....	197
TECHNIQUE FOR ELECTROPHYSICAL CONTROL OF PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CONSTRUCTION MATERIALS TO REDUCE THE RISK OF EMERGENCY SITUATIONS Alekseyev Dmitriy Vladimirovich.....	202

TECHNOGENIC FACTOR IN RISK ASSESSMENT IN RAILWAY TRANSPORT Sergeeva Margarita Dmitrievna.....	206
APPLICATION OF ELECTROLYTIC OXIDATION METHODS TO SOLVE SOME PROBLEMS OF PEOPLE WITH DISORDERS OF THE MUSCULOSKELETAL SYSTEM Zolkin Alexey Nikolaevich, Pavlov Andrey Ivanovich, Tchufistov Oleg Evgenevich.....	211
LEGISLATIVE REGULATION OF THE CONCEPT OF FIRST AID AT TECHNOSPHERE ACCIDENTS Reva Yuri Viktorovich, Tregubov Pavel Olegovich.....	215
PURIFICATION WASTE WATER FROM SALTS HEAVY METALS OF INDUSTRIAL PRODUCTIONS Demidov Artem Andreevich, Pashinin Valery Alekseevich, Polyanskova Ekaterina Aleksandrovna, Panfilova Irina Sergeevna, Zuparova Valentina Vladimirovna.....	220

УДК 001.891.57

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0001

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ

© 2021

Бусыгин Сергей Валерьевич, аспирант кафедры «Тепловая и топливная энергетика»

Ковальногов Владислав Николаевич, доктор технических наук,
заведующий кафедры «Тепловая и топливная энергетика»

Чукалин Андрей Валентинович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Тепловая и топливная энергетика»

*Ульяновский государственный технический университет
(432027, Россия, Ульяновск, улица Северный Венец, 32,*

e-mails: sergey18.06.95@mail.ru, kvn@ulstu.ru, chukalin.andrej@mail.ru)

Аннотация. Большая часть стран в настоящее время осуществляет перевод экономики на низкоуглеродное развитие, которое оказывает свое влияние на энергетическую отрасль страны. Цель перехода – снижение вредного воздействия на окружающую среду. В настоящей статье представлено моделирование процесса горения топливовоздушной смеси на основе природного газа с предложенной переорганизацией рециркуляции дымовых газов на энергетическом паровом котле (далее – котлоагрегат) типа ТГМЕ-464, с применением программного комплекса *Ansys Fluent*. В статье представлены графики распределения содержания NO_x в зоне активного горения при изменении доли рециркуляции дымовых газов от 0 до 22%. При предложенном процессе переорганизации рециркуляции дымовых газов на котлоагрегате типа ТГМЕ-464 снижение эмиссии вредных веществ объясняется снижением в зоне активного горения максимальной температуры, являющейся основным индикатором образования термических NO_x . Статья предназначена для аспирантов, докторантов, интересующихся разработкой методов подавления образования NO_x в продуктах сгорания котлов ТЭС.

Ключевые слова: низкоуглеродное развитие, рециркуляция дымовых газов, термические оксиды азота, тепловые электростанции, энергетический паровой котел, зона активного горения, моделирование, *Ansys Fluent*, горелочное устройство, нижний ярус, ТГМЕ-464, природный газ, численный расчет.

MATHEMATICAL SIMULATION AND EFFICIENCY INVESTIGATION RECIRCULATION OF FLUE GASES OF A POWER-GENERATING BOILER

© 2021

Busygin Sergey Valerievich, postgraduate student of the department of Heat and power engineering

Kovalnogov Vladislav Nikolaevich, doctor of technical sciences,
head of the department of Heat and power engineering

Chukalin Andrey Valentinovich, candidate of technical sciences,
assistant professor of the department of Heat and power engineering

*Ulyanovsk State Technical University
(432027, Russia, Ulyanovsk, str. Severny Venets, 32,*

e-mail: sergey18.06.95@mail.ru, kvn@ulstu.ru, chukalin.andrej@mail.ru)

Abstract. An increasing number of countries are now shifting their economies to low-carbon development, which has an impact on the energy sector. The goal of the transition to low – carbon development is to reduce the negative environmental impact. This article presents a simulation of the combustion process of a fuel-air mixture based on natural gas with the proposed organization of flue gas recirculation in the a power-generating boiler of the TGMT-464 type, using the *Ansys Fluent* software package. The article presents graphs of the distribution of the NO_x content in the active combustion zone when the proportion of flue gas recirculation changes from 0 to 22 %. In the proposed process of organizing the flue gas recirculation on a power-generating boiler of the type TGME-464, the reduction in the emission of harmful substances is explained by a decrease in the peak temperature in the active combustion zone, which is the main indicator of the formation of thermal NO_x . The article is intended for postgraduates, doctoral students interested in the development of methods for suppressing the formation of NO_x in the combustion products of TPP boilers.

Keywords: low-carbon development, thermal NO_x , thermal power plants, power-generating boiler, flue gas recirculation, active combustion zone, simulation, *Ansys Fluent*, burner device, bottom level, TGME-464, natural gas, numerical computation.

Введение. Большая часть находящихся на различных уровнях развития стран, в настоящее время, осуществляет перевод своей экономики к низкоуглеродному развитию [1]. Цель перехода – снижение вредного воздействия на окружающую среду. Данная цель заложена и в разрабатываемую в настоящий мо-

мент «Стратегию долгосрочного развития РФ до 2050 года с низким уровнем выбросов парниковых газов» [2]. Главная из отраслей экономики, на которую оказывает свое влияние низкоуглеродное развитие – энергетика.

В соответствии с прогнозным спросом на электро-

энергию по Единой энергетической системе России (далее – ЕЭС РФ) до 2026 года ожидается ежегодный прирост потребления электрической энергии, более 1,1% в год. Прогнозная величина производства электроэнергии по ЕЭС РФ к 2026 г. составит более 1150 млрд. кВт·ч, что больше фактической величины потребления электрической энергии 2019 года более чем на 70 млрд. кВт·ч [3]. Наряду с этим, процент тепловых электростанций (далее – ТЭС) в прогнозной структуре производства электроэнергии за период 2020 – 2026 г. по ЕЭС РФ составляет от 62,8% до 66,8%, с устойчивой потребностью в газе 71,7 – 72,5% от общей потребности ТЭС в органическом топливе [3]. Приведенный анализ указывает на то, что при ежегодном приросте потребления электрической энергии, присутствует стабильный рост объема потребления природного газа от 1,1 до 3,8% в год, преимущественно сжигаемого в энергетических котлах ТЭС.

При работе на природном газе, основным загрязняющим элементом в уходящих газах энергетических паровых котлов ТЭС являются термические оксиды азота (далее – NO_x) на образование которых в первую очередь оказывает влияние температура в ядре горения, и ряд технических и режимных мероприятий, таких как впрыск влаги в зону горения, рециркуляция дымовых газов [4], секционирование топки, нестехиометрическое и ступенчатое сжигание [5], снижение температуры горячего воздуха, комбинированное сжигание природного газа с биогазом [6] со специальной конструкцией горелок [7] и совместные методы подавления образования оксидов азота направлены [8] на ее снижение.

В настоящее время ГОСТ Р 50831-95 и ГОСТ 28269-89 [9, 10] регламентируют норматив удельных выбросов в атмосферу от энергетических установок, введенных в эксплуатацию на ТЭС, как до, так и после 2000 г., а Постановление Правительства РФ от 03.03.2017 N 255 (ред. от 17.08.2020) [11] регламентирует расчет и процесс взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду. Для разработки новых технических и режимных мероприятий, направленных на подавление NO_x важно иметь теоретические данные о влиянии внедряемых мероприятий на количество образовавшихся вредных веществ в зоне активного горения энергетических паровых котлов ТЭС. В настоящее время существует возможность моделирования топочных процессов с возможностью оценки эффективности новых разработанных мероприятий по сокращению эмиссии загрязняющих веществ.

Целью научной работы является разработка технических и организационных решений, направленных на подавление образования NO_x в продуктах сгорания котлов ТЭС с рециркуляцией дымовых газов, на основе предложенной адекватной модели, позволяющей оценить возможную эффективность реализации разработанных мероприятий.

Материалы и результаты исследования. *1. Характеристика объекта научной работы.* Котлоагрегат

типа ТГМЕ-464 (Е-500-13,8-560ГМН) спроектирован в 60-е годы XX века ПО ТКЗ «Красный котельщик». Котлоагрегат оборудован восьмью горелочными устройствами типа ГМУ-45, предназначенными для отдельного и совместного сжигания газа и мазута и расположенными в два яруса на отметках +6,15 м и +8,75 м на заднем экране. Номинальная тепловая мощность каждой горелки – 45 МВт, общая паропроизводительность данного типа котлов – 300 Гкал/ч (500 тонн пара в час). Горелочное устройство (рис. 1) имеет 2 закручивающихся аппарата, предназначенных для закрутки потока воздуха и 2 ряда отверстий разного диаметра, предназначенных для подачи газа. Природный газ подается в пространство между трубами с диаметрами 0,245 м и 0,325 м, расположенными в центральной части горелочного устройства.

Одной из особенностей конструкции данного типа котлов является исполнение труб участка фронтного экрана – теплоизолированного пода, имеющего угол наклона в 150, спроектированного для исключения возможности повреждения экранных труб из-за возможного расслоения потока. Согласно проведенному в работе [12] исследованию установлена еще одна конструктивная особенность – максимум теплового потока ($470-500 \text{ кВт/м}^2$) расположен ниже оси нижнего яруса горелок (+6,15 м), что поясняется развитием пламени горелок нижнего яруса между факелом верхнего яруса и теплоизолированным подом с переизлучением в зону активного горения. При реконструкции в 1998 г. котла ТГМЕ-464 ст. №2 Саратовской ТЭЦ-5 [13] был установлен подовый экран с внутренним винтовым оребрением, но без огнеупорного покрытия. Реализация данного технического решения позволила, за счет исключения переизлучения в зону активного горения, обеспечить снижение выбросов NO_x до 25-30%.



Рисунок 1 – Эксплуатируемое горелочное устройство типа ГМУ-45 котлоагрегата типа ТГМЕ-464

2. Проведение численного эксперимента с использованием модели. Для определения возможности снижения образования NO_x в зоне активного горения котлоагрегата типа ТГМЕ-464 применялась модель, разработанная при применении программного комплекса (далее – ПК) *Ansys Fluent*. Данный ПК явля-

ется многоцелевым пакетом, имеющим в своем распоряжении инструменты для моделирования течений жидкости и газа, в том числе включая модуль *Fluent*, решатель которого основан на конечно-объемном методе (МКО) решения [16].

На первом этапе подготовки расчётной модели, с использованием модуля «*Design Modeler*» смоделирована камера сгорания с одним горелочным устройством типа ГМУ-45 с суммарной производительностью по газу $Q = 4500 \text{ м}^3/\text{час}$. С целью получения адекватных результатов, в качестве исходных данных для построения 3D модели горелочного устройства (рис. 2) применялись конструктивные показатели, включая габаритные размеры, количество элементов закручивающего аппарата, углы закруток потока, рядность и количество отверстий выхода газа эксплуатируемого горелочного устройства представленного на рисунке 1. Смоделированная камера сгорания представляет собой цилиндрическую поверхность со следующими геометрическими характеристиками: $L = 7 \text{ м}$; $D = 1,46 \text{ м}$.

Генерация расчётной сетки камеры сгорания с одним горелочным устройством осуществлялась с использованием универсального сеточного генератора *Ansys «Meshing»* с методом построения «*Patch Conforming*», преимущественно подходящего для геометрии с мелкими элементами. Визуализация расчётной сетки представлена на рисунке 3: применена нерегулярная структурированная сетка с применением призматических слоев [16] и сгущением элементов в зоне выхода воздуха и природного газа.

На втором этапе определены, используемые в решателе, уравнения движения сплошной среды, свой-

ства применяемых в решении материалов - химических и физических свойств с учетом подачи в камеру сгорания газов рециркуляции, заданы граничные условия. В целом полученные результаты зависят от выбора модели турбулентности. Для исследования тепловых и газодинамических процессов в работе используется модель турбулентности $k-\epsilon$ (*realizable*), позволяющая моделировать процесс горения топливо-воздушной смеси котлов при сжигании газа и оценить интенсивность образования NO_x [14, 15].

В ходе исследования смоделировано горение природного газа в камере сгорания с одним горелочным устройством типа ГМУ-45, с подачей газов рециркуляции (при $r = 0 \div 22\%$), отбираемых до РВП и вводимых в короб горячего воздуха, так и без подачи газов рециркуляции. Моделируемый расход природного газа $Q = 3936 \text{ м}^3/\text{час}$, что соответствует 80% паровой нагрузки котлоагрегата типа ТГМЕ-464 [17]. На рисунке 4 представлены результаты численного расчета разработанной модели при температуре воздуха на входе в горелочное устройство $T = 477 \text{ К}$ [18] и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,02$.

Разработанная и представленная модель успешно позволяет смоделировать процесс горения топливо-воздушной смеси котлов при сжигании газа и оценить интенсивность образования NO_x .

Согласно приведенной в п. 1. характеристике объекта научной работы – котлоагрегата типа ТГМЕ-464 установлено, что максимум теплового потока расположен ниже оси нижнего яруса горелок, что свидетельствует о необходимости снижения температуры именно в данной зоне котла.

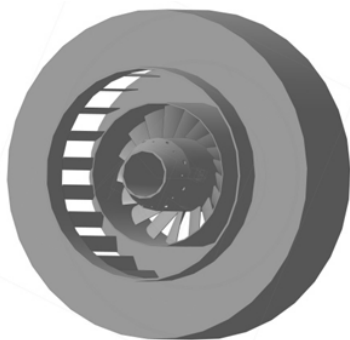


Рисунок 2 – Смоделированное горелочное устройство

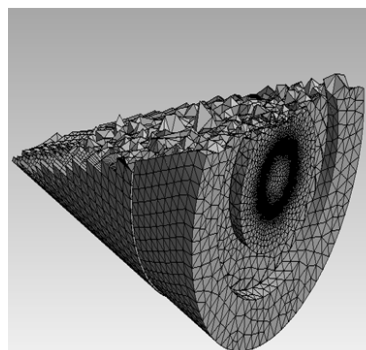


Рисунок 3 – Расчётная сетка камеры сгорания с одним горелочным устройством

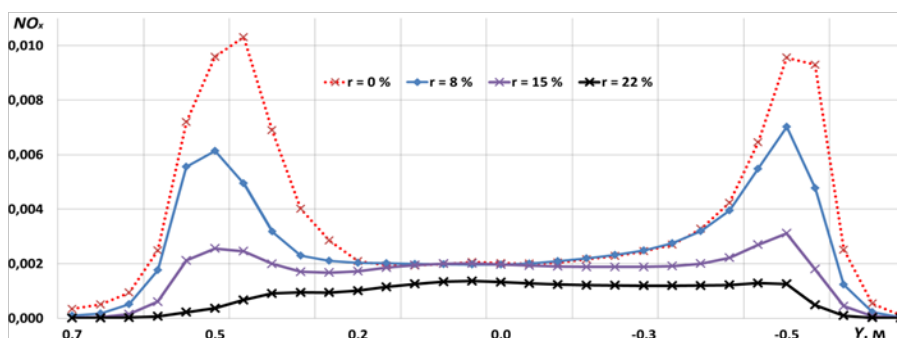


Рисунок 4 – Профиль содержания NO_x в вертикальном сечении пламени на расстоянии 2 м от амбразуры смоделированного горелочного устройства (2;Y;0): красная прямая при $r = 0\%$; синяя прямая при $r = 8\%$; фиолетовая прямая при $r = 15\%$; черная прямая при $r = 22\%$. Ось ординат – содержание NO_x ; ось абсцисс – вертикальное сечение пламени, м.

Из анализа рисунка 4 видно, что при увеличении степени подачи газов рециркуляции ($r = 0 \div 22\%$) происходит снижение содержания NO_x по фронту факела, что объясняется снижением максимальной температуры, являющейся основным индикатором образования термических NO_x . Для снижения содержания NO_x в продуктах сгорания котлоагрегата типа ТГМЕ-464 предлагается снизить температуру в зоне с максимальными тепловыми потоками за счет переорганизации рециркуляции дымовых газов: перераспределить степень подачи газов рециркуляции между первым и вторым ярусами горелок, направив большую их часть к нижнему ярусу.

3. Проверка адекватности полученных результатов численного эксперимента. При проведении анализа полученных результатов вычислительного эксперимента, проведенного на ЭВМ в программной среде *Ansys Fluent*, по представленной выше методике, возникает вопрос о соответствии полученных результатов реальной системе.

Для проверки на адекватность предложенной модели проведен литературный обзор экспериментальных данных проведенных в разные годы на котлоагрегатах ТЭС (рис. 5) и изучен профиль содержания NO_x по длине факела в смоделированной камере сгорания, сформированный по результатам численного эксперимента, проведенного в программной среде *ANSYS Fluent*.

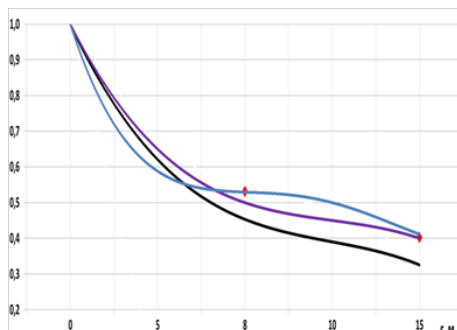


Рисунок 5 – Сравнение экспериментальных данных и результатов численного решения: синяя прямая – котлоагрегат ТГМЕ-464 при производительности 400-405 т/ч [19], фиолетовая прямая – котлоагрегат ТГМЕ-464 при производительности 450-460 т/ч [19], черная прямая – котлоагрегат ТГМЕ-464 при производительности 470-480 т/ч [19], красная точка – результаты численного решения. Ось ординат – отношение концентрации NO_x при некотором значении r концентрации при $r = 0\%$, определенные по экспериментальным данным и выраженные полиномиальной зависимостью 3-4 степени; ось абсцисс – степень рециркуляции r , %.

Полученные результаты сопоставимы с экспериментальными данными, отклонение составляет менее 10%, что является удовлетворительным результатом для задач данного уровня и свидетельствует об адекватности предложенной выше модели.

Заключение. При применении программной среды *Ansys Fluent*, предложена адекватная модель камеры сгорания с одним горелочным устройством типа ГМУ-45, позволяющая оценить возможную эффективность реализации мероприятий, направленных на подавление образования NO_x в продуктах сгорания

котлов ТЭС. Для снижения содержания NO_x в продуктах сгорания котлоагрегата типа ТГМЕ-464 предлагается снизить температуру в зоне с максимальными тепловыми потоками, расположенную между осью нижнего яруса горелок (+6,15 м) и теплоизолированным подом с переизлучением в зону активного горения. Температуру предлагается снизить за счет переорганизации рециркуляции дымовых газов: перераспределить степень подачи газов рециркуляции между первым и вторым ярусами горелок, направив большую их часть к нижнему ярусу.

Исследования выполнены при поддержке грантом Президента Российской Федерации по проекту НШ-2493.2020.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Макаров И.А., Степанов И.А. Парижское соглашение по климату: влияние на мировую энергетику и вызовы для России. – Актуальные проблемы Европы, №1, 2018 –77-100 с.
2. Проект стратегии долгосрочного развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Режим доступа: https://economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya_rossii_podgotovilo_proekt_strategii_dolgosrochnogo_razvitiya_rossii_s_nizkim_urovнем_vybrosov_parnikovyh_gazov_do_2050_goda_.html
3. Приказ Минэнерго России от 30.06.2020 № 508 «Об утверждении Схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2020 - 2026 годы».
4. Кобзарь С. Г., Халатов А. А. Снижение выбросов оксидов азота в газовых котлах методом рециркуляции дымовых газов. – Промышленная теплотехника №4, 2009. – С. 5-11.
5. Areklett Ivar, Nygaard Lynn P. Emission-free gas power: Soon realizable - Greenhouse Issues. 2001. № 57. P. 4.
6. Usama J. Mizher, Vladislav N. Kovalnogov, Andrei V. Chukalin, Sergey V. Busygин, and Ruslan V. Fedorov, "Simulation of the processes of combined fuel combustion and analysis of harmful substances emissions", AIP Conference Proceedings 2343, 130010 (2021) <https://doi.org/10.1063/5.0047875>.
7. Патент на полезную модель RU 201 164 от 01.12.2020 г.
8. Росляков П. В., Ионкин И. Л. Снижение выбросов оксидов азота на котле ТГМЕ – 464. – Теплоэнергетика №1, 2015. – С. 45-52.
9. ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования.
10. ГОСТ 28269-89. Котлы паровые стационарные большой мощности.
11. Постановление Правительства РФ от 03.03.2017 N 255 (ред. от 17.08.2020) "Об исчислении и взаимной платы за негативное воздействие на окружающую среду".
12. Холщев В. В. Сравнительный анализ двух экспериментов, проведенных в разные годы на мазутных котлах. – Электр. ст. № 3, 2001 – С. 12-16.
13. Медведев В. А., Мясникова О. Ю. О модернизации котельного агрегата ТГМЕ-464 Саратовской ТЭЦ-5 с целью снижения выбросов NO_x путем применения труб с внутренним винтовым оребрением в подовой поверхности нагрева. – Новости теплоснабжения №10, 2013. – С. 28-31.
14. ANSYS FLUENT 12.0. Theory Guide. April, 2009.
15. Н. К. Versteeg and W. Malalasekera. An introduction to computational fluid dynamics. 2nd ed., 2007. 517 p.
16. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.
17. Технический отчет по результатам проведения опытов пересмотра энергетических характеристик энергетического котла типа ТГМЕ-464 ст. № 3, установленного на Чебоксарской ТЭЦ-2, ООО «ЮгЭнергоИнжиниринг», 2017. – 76 с.
18. Тепловой расчет котла ТГМЕ-464 (нагрузка 50%, топливо – газ), ТКЗ «Красный котельщик», 1976. – 8 с.
19. Петров Ю.И., Меренов А.А., Усман Ю.М. и др. Снижение выбросов NO_x на котлах ТГМЕ-464 малозатратной реконструкцией горелок. – Электр. ст. № 10, 2001 – С. 2-6.
20. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.

Статья поступила в редакцию 27.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 519.6

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0002

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНОМ ТРЕХМЕРНОМ ЭЛЕКТРОДЕ

© 2021

Гвоздева Ирина Геннадьевна, старший преподаватель кафедры
«Информационно-вычислительные системы»

Кошев Александр Николаевич, доктор химических наук,
профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы»

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, e-mails: gvozd_69@mail.ru, koshev@pguas.ru)

Варенцов Валерий Константинович, доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник лаборатории гетерогенных систем
Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН

(630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18, e-mail: vvk@ngs.ru)

Кузина Валентина Владимировна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-вычислительные системы»

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, e-mail: kuzina@pguas.ru)

Аннотация. Рассмотрены математические аспекты моделирования процессов в проточных трехмерных электродах из углеродных волокнистых материалов. Представлены моделирующие уравнения и граничные соотношения при упрощениях и допущениях, которые часто правомерны при моделировании реальных электрохимических процессов в пористых средах. Приведенные положения и утверждения будут справедливы и в более общих случаях, таких как, например, многомерность модели, ее нестационарность в случае зависимости параметров модели и электрохимических констант от изменяющихся во времени технологических и реакционных условий процесса, а также при возможных корректировках управляющих параметров. Углеродные волокнистые материалы рассмотрены как новый тип электродов, которые могут использоваться для извлечения ионов тяжелых и цветных металлов из сточных вод промышленных предприятий. Цель исследования – получение представления о поведении электрохимической системы в зависимости от соотношения параметров и исследование режимов электролиза при малых плотностях тока методами математического моделирования. Приведены результаты расчетов с использованием пакета *MathCAD*, иллюстрирующих влияние некоторых параметров электрохимической системы на распределение потенциала по толщине электрода, а, следовательно, и на эффективность всего процесса электролиза. В результате исследования подтверждено, что даже при малых значениях поляризующего тока равномерность распределения потенциала, а, следовательно, и всего процесса достаточно чувствительна к параметрам электрохимической системы и может рассматриваться как критерий оптимизации.

Ключевые слова: математическое моделирование электрохимических процессов, проточные трехмерные электроды, углеграфитовые волокнистые материалы, очистка сточных вод от ионов металлов.

MATHEMATICAL AND NUMERICAL SIMULATION OF ELECTROCHEMICAL PROCESSES IN A THREE-DIMENSIONAL FLOW ELECTRODE

© 2021

Gvozdeva Irina Gennadievna, senior lecturer of the department «Information and computing systems»

Koshev Alexander Nikolaevich, doctor of chemistry science,
professor of the department «Information and computing systems»

Penza State University of Architecture and Construction
(440028, Russia, Penza, German Titov St., 28, e-mails: gvozd_69@mail.ru, koshev@pguas.ru)

Varentsov Valery Konstantinovich, doctor of technical sciences, professor
Solid State Chemistry and Mechanochemistry of Siberian branch of Russian Academy of Science
(630128, Russia, Novosibirsk, st. Kutateladze, 18 E-mail: vvk@ngs.ru)

Kuzina Valentina Vladimirovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the department «Information and computing systems»

Penza State University of Architecture and Construction
(440028, Russia, Penza, German Titov St., 28, e-mail: kuzina@pguas.ru)

Abstract. Mathematical aspects of modeling processes in flowing three-dimensional electrodes made of carbon fiber materials are considered. Modeling equations and boundary relations are presented with simplifications and assumptions, which are often legitimate when modeling real electrochemical processes in porous media. The above provisions and statements will also be valid in more general cases, such as, for example, the multidimensionality of the model, its nonstationarity in the case of the dependence of the model parameters and electrochemical constants

on the technological and reaction conditions of the process varying in time, as well as with possible adjustments of the control parameters. Carbon fiber materials are considered as a new type of electrodes that can be used to extract heavy and non-ferrous metal ions from industrial wastewater. The purpose of the study is to obtain an idea of the behavior of the electrochemical system depending on the relationship of parameters and to study electrolysis modes at low current densities using mathematical modeling methods. The results of calculations using the MathCAD package are given, illustrating the influence of some parameters of the electrochemical system on the distribution of potential over the thickness of the electrode, and, therefore, on the efficiency of the entire electrolysis process. As a result of the study, it was confirmed that even with small values of the polarizing current, the uniformity of the distribution of the potential, and therefore of the whole process, is quite sensitive to the parameters of the electrochemical system and can be considered as an optimization criterion.

Keywords: mathematical modeling of electrochemical processes, flowing three-dimensional electrodes, carbon-graphite fibrous materials, wastewater treatment from metal ions.

Введение. Электрохимические системы с проточными трехмерными электродами (ПТЭ) из углеродных волоконистых материалов (УВМ) обладают развитой реакционной поверхностью (4000-5000 см²/г), что в сочетании с достаточно высокой электропроводностью и возможностью организации интенсивного массопере-носа способно обеспечить электроосаждение значительного количества металла на единицу веса материала катода даже из электролитов малой концентрации (10⁻²-10⁻⁷ моль/л) [1, 2].

Известны различные конструкции промышленных и опытно-промышленных реакторов с использованием углеродных волоконистых электродов [3]. Один из вариантов конструкции ПТЭ представлен на рисунке 1. Описан опыт использования ПТЭ в различных процессах, в частности при извлечении металлов из разбавленных растворов, лабильзации комплексов платиновых металлов, создании замкнутых локальных процессов в гальванотехнике [4-9]. В то же время показано, что возможности интенсификации указанных электрохимических процессов на проточных трехмерных электродах из УВМ использованы далеко не полностью.

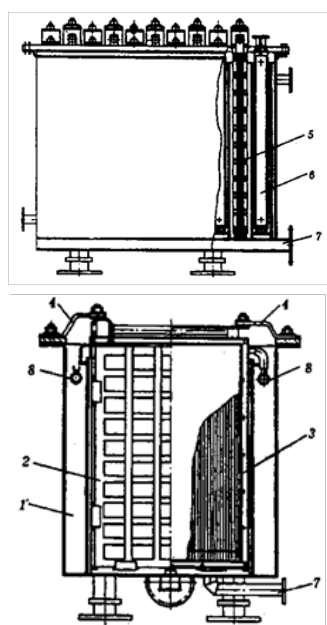


Рисунок 1 – Конструкция электролизера с камерами касетного типа: 1 – корпус, 2 – катодная камера, 3 – анодная камера, 4 – токоподводы, 5 – катод, 6 – анод, 7, 8 – трубопроводы

В силу большого количества факторов, влияющих на эффективность работы электролизеров с ПТЭ, определить оптимальные условия их эксплуатации возможно только при использовании математического моделирования, оптимизации и оптимального управления электрохимическими процессами, происходящими в порах проточных трехмерных электродов, в сочетании с экспериментальными методами.

Известны работы, например [10-18], посвященные построению математических моделей процессов в ПТЭ, от самых простых стационарных однокомпонентных одномерных моделей до сложных систем интегро-дифференциальных уравнений.

В данной работе авторами рассмотрены математические аспекты моделирования процессов в ПТЭ при упрощениях и допущениях, которые часто правомерны при моделировании реальных электрохимических процессов в пористых средах. Естественно, приведенные положения и утверждения будут справедливы и в более общих случаях, таких как, например, многомерность модели, ее нестационарность в случае зависимости параметров модели и электрохимических констант от изменяющихся во времени технологических и реакционных условий процесса, а также при возможных корректировках управляющих параметров (плотности подаваемого на ПТЭ тока, скорости потока электролита, электропроводности раствора и материала электрода и т.п.).

Цель исследования – получение представления о поведении электрохимической системы в зависимости от соотношения параметров и исследование режимов электролиза при малых плотностях тока методами математического моделирования.

Методы и материалы исследования. *Математическая модель.* Электрохимический процесс, при котором противоэлектроды электрохимического реактора представляют собой взаимно параллельные плоскости, а вектор направления потока электролита совпадает с направлением вектора силового электрического поля, можно описать одномерной математической моделью в виде дифференциального уравнения для неизвестных функций плотности тока $J(x)$ и потенциала $E(x)$. Такая модель построена нами для случая, когда $\kappa_T(x)$ и $\kappa_{ж}(x)$ – электропроводности твердой и жидкой фазы – зависят от координаты точки на ПТЭ. Отметим, что математическая модель процесса, когда

$\kappa_T(x)$ и $\kappa_{ж}(x)$ представляют собой постоянные величины, приведена в работе [10]. Используя те же принципы, как и в статье [10], нами получена математическая модель, учитывающая зависимость электропроводностей твердой и жидкой фаз от координаты электрода, подробный вывод которой приведен в работе [16]:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = \frac{-\kappa_T'(x)\kappa_{ж}}{\kappa_T(x)(\kappa_T(x) + \kappa_{ж})} \frac{dE}{dx} + S_v \left(\frac{1}{\kappa_T(x)} + \frac{1}{\kappa_{ж}} \right) J(x), \quad (1)$$

$$J(x) = j_0 \frac{\exp(\alpha ZFE(x)/RT) - \exp((\alpha - 1)ZFE(x)/RT)}{1 + j_0 \exp(\alpha ZFE(x)/RT) / ZFK_m C(x)}, \quad (2)$$

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{S_v}{vZF} J(x); \quad (3)$$

$$\frac{dE}{dx}(0) = -\frac{J}{\kappa_T(0)}; \quad \frac{dE}{dx}(L) = \frac{J}{\kappa_{ж}}; \quad C(0) = C_0. \quad (4)$$

В этих уравнениях S_v – удельная реакционная поверхность углеродистого материала; v – скорость протока раствора электролита; j_0 – плотность тока обмена; K_m – коэффициент массопереноса; J – плотность поляризующего тока; $C(x)$ – концентрация электроактивного компонента. Модели для расчета профиля электропроводности электрода $\kappa_T(x)$ описаны, например, в статье [19].

Дифференциальные уравнения (1) – (4) можно использовать для расчета электрохимического процесса в проточных трехмерных электродах для большинства электролизеров с ПТЭ, используемых в практике извлечения благородных и цветных металлов. Если процесс извлечения металла сопровождается выделением существенного количества водорода, то математическую модель (1) – (4) необходимо дополнить уравнениями, приведенными в нашей работе [20].

Моделирование начальных значений потенциала электрода, как начальных данных для решения задачи Коши.

Для решения дифференциальных уравнений (1) – (4) как задачи Коши необходимо знать начальное значение потенциала $E(0) = E_0$, которое, в общем случае, нельзя получить теоретическим или экспериментальным путем. Для решения таких задач обычно применяется так называемый «метод стрельбы», когда из тех или иных соображений задается начальное значение для производной, задача Коши решается, а затем решение уточняется путем варьирования начального значения E_0 в зависимости от точности попадания решения в известное конечное значение для производной $dE(0)/dx = -J/\kappa_T(0)$.

Запишем уравнение для плотности поляризующего тока (2) в упрощенном виде: $J_s(x) = j_0(e^{AE(x)} - e^{-CE(x)})$, где $A = \alpha ZF/RT$, $C = (1 - \alpha)ZF/RT$, $B = (1/\kappa_T + 1/\kappa_{ж})S_v$, применим технику интегрирования уравнения (1), как это было сделано нами в работе [15], окончательно получим формулу для оценки начального значения потенциала электрода в точке $x = 0$:

$$E(0) \approx \frac{2}{A} \ln \left(\frac{AJ}{2\kappa_T^2 B j_0} \right). \quad (5)$$

Эта формула успешно применяется нами при решении систем типа (1) – (4) при расчете электрохимических процессов в реакторах с проточными трехмер-

ными электродами.

Моделирование процессов в ПТЭ процесса при малых габаритных плотностях токов. Введем обозначения комплексов электролитических параметров:

$$E(0) = E_0; \quad E'(0) = E_1 = -\frac{J}{\kappa_T}; \quad C(0) = C_0; \quad K_1 = \frac{\kappa_T + \kappa_{ж}}{\kappa_{ж}\kappa_T} S_v j_0;$$

$$K_2 = \frac{\alpha ZF}{RT}; \quad K_3 = \frac{(1 - \alpha)ZF}{RT}; \quad K_5 = ZFK_m;$$

$$K_6 = \frac{\kappa_T \kappa_{ж} K_m}{(\kappa_T + \kappa_{ж})v}; \quad K_7 = \frac{S_v j_0}{vZF}; \quad K_8 = j_0 - \frac{J \kappa_{ж} K_m}{(\kappa_T + \kappa_{ж})v} + C_0 ZFK_m;$$

$$K_9 = K_1 K_6 (K_2 + K_3); \quad K_{10} = E_1 - \frac{C_0 \cdot K_1}{K_7}; \quad K_{11} = \frac{K_9 (E_1 - K_{10}) E_0}{2(K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1)}.$$

Математическая модель окислительно восстановительного процесса в электрохимической системе с проточными объемно пористыми электродами записывается в виде системы дифференциальных уравнений, связывающих между собой распределение потенциала электрода $E(x)$ и концентрации $C(x)$, где x – координата по толщине электрода, имеет вид:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = K_1 \left(\frac{\exp(K_2 E) - \exp(-K_3)}{1 + K_4 \exp(K_2 E) / K_5 C(x)} \right); \quad (6)$$

$$\frac{dC}{dx} = K_7 \left(\frac{\exp(K_2 E) - \exp(K_3 E)}{1 + \exp(K_2 E) / (K_5 C(x))} \right).$$

Решая эту систему (6) с начальными условиями: $E(0) = E_0$, $E'(0) = E_1$, $C(0) = C_0$, получим приближенные формулы для расчета распределения потенциала и концентрации по толщине электрода:

$$E(x) \approx E_0 + E_1 x + \frac{C_0 K_1 E_0}{2(K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1)} x^2; \quad (7)$$

$$C(x) \approx \frac{K_9}{K_1} \times \left(\frac{C_0 K_1 + \frac{C_0 K_1 E_0}{K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1} x + \left(\frac{C_0 K_1 E_1 + 2K_{11}(K_9 E_0 - E_1 K_2 K_4 - 2K_6 K_{11})}{4K_{11}(K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_1 K_6)} \right) x^2} \right). \quad (8)$$

Следовательно,

$$E(0) = \frac{2 \left(\frac{J}{\kappa_T} K_6 - K_8 \right) \left(\frac{J}{\kappa_T} + \frac{J}{\kappa_{ж}} \right)}{\left(\frac{J}{\kappa_T} + \frac{J}{\kappa_{ж}} \right) K_2 K_4 - 2C_0 K_1 L};$$

$$C(L) \approx \frac{K_9}{K_1} \left(\frac{C_0 K_1 + \frac{C_0 K_1 E_0 L}{K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1} + \left(\frac{C_0 K_1 E_1 + 2K_{11}(K_9 E_0 - E_1 K_2 K_4 - 2K_6 K_{11})}{4K_{11}(K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_1 K_6)} \right) L^2} \right).$$

Представление решения системы дифференциальных уравнений (6) в виде выражений (7), (8), естественно, правомерно только при достаточно малых величинах плотности поляризующего тока J , подаваемого на электрод. Многочисленные контрольные расчеты позволили нам определить границу значений поляризующего тока для различных соотношений параметров и констант электрохимического процесса, при которых правомерно использование такой математической модели. Эта граница определена нами, как 10^{-3} А/см². Для электрохимических параметров, принимающих значения из интервалов, приведенных в таблице 1, посредством численных решений системы дифференциальных уравнений (6) получены следующие величины экспонент, присутствующих в правых частях системы (6): при $J = 10^{-3}$ А/см² $\rightarrow e^{K_2 E} \div 1,042 - 1,48$; при $J = 10^{-4}$ А/см² $\rightarrow e^{K_2 E} \div 1,004 - 1,09$; при $J = 10^{-5}$ А/см² $\rightarrow e^{K_2 E} \div 1,007 - 1,03$.

Очевидно, что при таких значениях экспоненты,

близких к единице, экспоненциальная функция раскладывается в ряд до членов второго порядка с достаточной точностью (табл. 1).

Таблица 1 – Величины экспонент, полученные посредством численных решений системы дифференциальных уравнений (6)

Наименование параметра	обозначение	значение параметра
электропроводность твердой фазы	κ_T	0,1-1 См·См
электропроводность жидкой фазы	$\kappa_ж$	0,1 См·См
скорость протока	v	0,01-0,5 см/с
Плотность тока	J	$10^{-3}-10^{-7}$ А/см ²
Плотность тока обмена	J_0	$10^{-5}-10^{-8}$ А/см ²
концентрация ионов металла	C_0	$10^{-7}-10^{-4}$ моль/см ³
коэффициент переноса	a	0,3-0,5

Исследование поведения системы методом мате-

матического моделирования с использованием пакета *MathCAD* при плотностях токов, указанных в таблице 1, во-первых, позволяет получить некоторое представление о поведении электрохимической системы в зависимости от соотношения параметров, и, во-вторых, исследовать режимы электролиза при малых плотностях тока, с целью получения равномерного начального покрытия объемно-пористого электрода в качестве подготовки к эффективному протеканию основного процесса электроосаждения.

На рисунке 2 в качестве иллюстрации приведено распределение потенциала по толщине ПТЭ при значении электропроводности твердой фазы 0,1 См·см и средних значениях других электрохимических параметров.

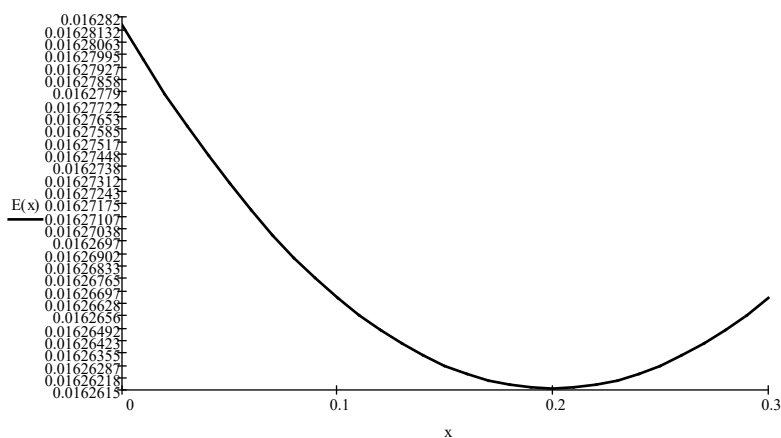


Рисунок 2 – Распределение потенциала по толщине ПТЭ

Результаты исследования. Результаты расчетов, иллюстрирующих влияние некоторых параметров электрохимической системы на распределение потенциала по толщине электрода, а, следовательно, на эффективность всего процесса электролиза, позволяют сделать следующие выводы:

- величина плотности тока значительно влияет на равномерность распределения потенциала по толщине электрода. Увеличение плотности тока от 10^{-6} до 10^{-4} А/см² приводит к улучшению равномерности распределения потенциала. Это обусловливается тем, что при малых значениях габаритного тока значения потенциала в средних точках электрода близки к нулю.
- величина концентрации осаждаемых ионов металла также неоднозначно влияет на равномерность процесса, но её варьирование в пределах 10^{-7} – 10^{-5} моль/см³ не существенно изменяет распределение потенциала на ПТЭ.
- снижение скорости протока относительно среднего значения ухудшает распределение потенциала.
- изменение тока обмена электрохимической реакции в пределах от 10^{-5} – 10^{-8} А/см² не оказывает существенного влияния на равномерность распределения потенциала.
- увеличение электропроводности твердой фазы системы, как и ожидалось, влечет за собой некоторое улучшение равномерности распределения потенциала.

• изменение коэффициента переноса в пределах значений от 0,3 до 0,5 незначительно ухудшает распределение процесса по толщине пористого электрода.

Заключение. В результате выполненного исследования, приведенного в настоящей работе, получена математическая модель, описывающая электрохимические процессы, проходящие в объеме трехмерного проточного электрода из углеродистого волокнистого материала, в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Получены формулы для определения значений краевых условий, налагаемых на неизвестные функции, что позволило представить задачу в виде классической задачи Коши для системы дифференциальных уравнений. Проведенные численные расчеты показали, что даже при малых значениях поляризующего тока, равномерность распределения потенциала, а, следовательно, и всего процесса, достаточно чувствительна к параметрам электрохимической системы и может рассматриваться как критерий оптимизации процесса в ПТЭ по электрохимическим и технологическим параметрам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Углеродные волокнистые электроды: свойства, модификация, процессы и электролизеры. Математическое моделирование и оптимизация: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2021. – 176 с.

2. Варенцов, В.К. Современные проблемы электролиза и задачи оптимизации процессов в реакторах с трехмерными углеродными электродами: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 286 с.
3. Варенцов, В.К. Современные проблемы технической электрохимии. Ч. III. Электрохимические реакторы и процессы с проточными углеродными электродами / В.К. Варенцов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 124 с.
4. Окислительно-восстановительные процессы на проточных трехмерных электродах. Математическое моделирование. Теория. Эксперимент: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2020. – 172 с.
5. Варенцов, В.К. Современные проблемы технической электрохимии. Ч. II. Электролиз с проточными углеродными электродами в гальванотехнике / В.К. Варенцов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 105 с.
6. Варенцов В.К. Электролиз с трехмерными электродами в процессах регенерации металлов из промывных растворов гальванических производств / В.К. Варенцов // Изв. СО АН СССР, Сер. хим. наук, 1988, № 9/3. – С. 124–138.
7. Ковалёва О.В. Интенсификация электрохимических процессов регенерации быстроокисляющихся электролитов железнения / О.В. Ковалёва, В.М. Шайдулин, В.К. Варенцов // Малоотходные и ресурсосберегающие процессы в гальванотехнике: материалы семинара. – М.: ИДНТП, 1988. – С. 55–58.
8. Перельгин Ю.П. Реакции на катоде при электроосаждении металлов. / Ю.П. Перельгин, С.Ю. Киреев, Ю.Н. Кирилина. // Гальванотехника и обработка поверхности, 2019, Т. 27, № 4. – С. 28–32.
9. Maarof H.I. Recent trends in removal and recovery of heavy metals from wastewater by electrochemical technologies / H.I. Maarof, W.M.A.W. Daud, M.K. Aroua // Heavy metal removal and recovery, 2016, Vol. 33. – P. 1–28.
10. Даниель-Бек В.С. К вопросу о поляризации пористых электродов / В.С. Даниель-Бек // Журнал физической химии, 1948, Т. 22. – С. 697–710.
11. Гуревич Н.Г. Работа жидкостных пористых электродов в режиме с вынужденной подачей реагентов / Н.Г. Гуревич, В.С. Баготский // Инженерно-физический журнал, 1963, Т.6, №2. – С. 75–86.
12. An improved model of potential and current distribution within a flow-through porous electrode / T. Doherty, J.G. Sunderland, P.L. Roberts, D.J. Pickett // Electrochem. Acta, 1996, Т. 41, №4. – P. 519–526.
13. Замятин А.П. Компьютерная диагностика свойств и комплексный анализ состава технологических растворов при оптимизации процессов гальванических производств / А.П. Замятин, Р.Ю. Бек // Химия в интересах устойчивого развития, 1997, Т. 5. – С. 479–490.
14. Теоретические основы и моделирование электрохимических процессов в системах с проточными трехмерными электродами: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, И.Ф. Сухов, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 128 с.
15. Кошев А.Н. Разработка и исследование математических моделей нестационарных процессов в электрохимических реакторах с проточными трехмерными электродами: моногр. / А.Н. Кошев, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 119 с.
16. Гвоздева И.Г. Управление электрохимическим реактором с проточными трехмерными электродами за счет оптимального распределения электропроводности системы / И.Г. Гвоздева, А.Н. Кошев, В.К. Варенцов // Управление большими системами, 2010, № 29. – С. 184–200.
17. Кузина В.В. Математические модели для автоматизированного контроля концентрации ионов металлов в промышленных стоках / В.В. Кузина, А.П. Замятин, А.Н. Кошев // Автоматизация и современные технологии, 2008, № 11. – С. 38–43.
18. Кузина В.В. Математические модели в задачах вольтамперометрического анализа / В.В. Кузина, А.П. Замятин, А.Н. Кошев // Экологические системы и приборы, 2006, № 8. – С. 37–41.
19. Кошев А.Н. Влияние заполнения проточного объемно-пористого катода осаждающимся металлом на электропроводность твердой фазы системы электрод-электролит / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, Г.Н. Глейзер. // Электрохимия, 1992, Т. 28, № 8. – С. 1170–1176.
20. Варенцов, В.К. Моделирование процесса газообразования водорода в проточных трехмерных электродах при извлечении металлов из растворов электролитов / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство, 2017, № 3 (32). – С. 128–135.

Статья поступила в редакцию 27.10.2021
Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 004.032.26

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0003

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ОБУЧАЮЩЕГО АЛГОРИТМА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

© 2021

Зоткина Алена Александровна, аспирант кафедры «Программирование»

Мартышкин Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Программирование»

*Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11,
e-mails: alena.zotkina.97@mail.ru, alexey314@yandex.ru)*

Новоселова Ольга Викторовна, доцент кафедры «Общей и прикладной физики»

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, e-mail: olganovoselova51@rambler.ru)*

Аннотация. В статье рассматриваются обучающие алгоритмы нейронных сетей. Приводится математическая модель задачи машинного обучения, главной целью которой является минимизация функции потерь. Рассмотрен классический подход к задаче минимизации функции потерь на основе метода градиентного спуска. Приведен пример алгоритма классического градиентного спуска. В статье обосновано проектирование обучающего оптимизатора и рассмотрены модификации правил изменения параметров. Рассмотрен пример модифицированного алгоритма градиентного спуска. Обосновано использование рекуррентной нейронной сети в качестве оптимизатора. Выявлены недостатки базовой имплементации рекуррентных нейронных сетей и приведен пример использования подкласса рекуррентных сетей, способных запоминать значения как на короткие, так и на длинные промежутки времени *LSTM (Long Short Term Memory network)*. Отмечено, что в реализации оптимизатора используется высокоуровневый язык программирования Python с динамической строгой типизацией и автоматическим управлением памятью, в синтаксисе которого содержатся библиотеки *NumPy, Theano, Lasagne*. Выявлено, что проектирование алгоритма оптимизации может быть представлено в качестве задачи машинного обучения, позволяющей алгоритму научиться использовать структуру интересующих задач в автоматическом режиме. Приведен пример обучения оптимизатора и его реализации. В заключении сформулированы основные выводы по проделанной работе.

Ключевые слова: нейронная сеть, машинное обучение, рекуррентная нейронная сеть, оптимизатор, *Python, Long Short Term Memory network*.

TECHNIQUE FOR OPTIMIZING THE LEARNING ALGORITHM OF NEURAL NETWORKS

© 2021

Zotkina Alena Aleksandrovna, postgraduate of department «Programming»

Martyshev Alexey Ivanovich, candidate of technical sciences, associate professor,
head of the Department «Programming»

*Penza state technological University
(440039, Russia, Penza, BaydukovProyezd / Gagarin Street, 1a/11,
e-mails: alena.zotkina.97@mail.ru, alexey314@yandex.ru)*

Novoselova Ol'ga Viktorovna, associate professor of the department of general and applied physics

*National Research Moscow State University of Civil Engineering
(129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoe highway, 26, e-mail: olganovoselova51@rambler.ru)*

Abstract. The article discusses training algorithms for neural networks. A mathematical model of a machine learning problem is presented, the main goal of which is to minimize the loss function. A classical approach to the problem of minimizing the loss function based on the gradient descent method is considered. An example of a classical gradient descent algorithm is given. The article substantiates the design of a trainable optimizer and considers modifications of the rules for changing parameters. An example of a modified gradient descent algorithm is considered. The use of a recurrent neural network as an optimizer has been substantiated. The drawbacks of the basic implementation of recurrent neural networks are revealed and an example of using a subclass of recurrent networks capable of storing values for both short and long periods of time *LSTM (Long Short Term Memory network)*, is given. It is noted that the implementation of the optimizer uses a high-level programming language Python with dynamic strong typing and automatic memory management, the syntax of which contains the *NumPy, Theano, Lasagne* libraries. It was revealed that the design of an optimization algorithm can be represented in machine learning problems, allowing the algorithm to learn how to use the tasks of interest in an automatic mode. An example of training the optimizer and its implementation is given. In the conclusion, the main conclusions on the work done are formulated.

Keywords: neural network, machine learning, recurrent neural network, optimizer, Python, Long Short Term Memory network.

Введение. Большинство задач из области машинного обучения можно свести к задаче минимизации функции потерь, численное значение которой является оценкой достоверности предсказания для текущего обучающего или тестового примера. При этом цель обучения можно определить как подбор таких параметров функции потерь, при которых последняя с некоторой погрешностью достигает своего минимума. Оптимальные параметры достигаются в результате модификации исходных параметров путем последовательного применения определенного правила обновления. Решение подобных задач предполагает анализ и моделирование правил обновления, адаптированных к конкретным классам задач, причем типы представляющих интерес задач разнятся в различных исследовательских областях. Адаптация выполняется путем нахождения оптимальных гиперпараметров для конкретного подкласса задач, а повышения эффективности правил добиваются сужением этого подкласса. При этом ценой адаптации к структуре задач данной предметной области становится снижение эффективности применения правил обновления на задачах из другой предметной области. Другой подход к оптимизации предполагает замену разработанных вручную правил обновления правилами, сформированными в результате обучения нейронной сети.

Целью данной работы является разработка методики построения обучающего алгоритма, который работает на конкретном классе задач. Интерпретация моделирования алгоритма как задачи машинного обучения позволяет конкретизировать класс актуальных задач, используя для обучения правила соответствующий набор тренировочных данных.

Материалы и результаты исследования. Математическая модель задачи машинного обучения. Задача машинного обучения сводится к минимизации функции потерь. Представим нейронную сеть в виде математической модели [1–3].

$X = (X_1, \dots, X_k)$, где X_i – вектор, подающийся на вход нейронной сети $X_i \in R_n$;

$A = (A_1, \dots, A_k)$, где A_i – правильный вектор, $A_i \in R_m$;
(X, A) – обучающая выборка;

W – вектор весов нейронной сети;

$N(W, X)$ – функция, соответствующая нейронной сети;

$Y = N(W, X)$ – ответ нейронной сети, $Y \in R_m$;

$D(Y, A)$ – функция ошибки;

$Y = N(W, X)$ — ответ нейронной сети, $Y \in R_m$;

$D_i(Y) = D(Y, A)$ — функция ошибки на i -ом примере;

$E_i(W) = D_i(N(W, X))$ – ошибка сети на i -ом примере;

$E(W) = \sum_{i=1}^m E_i(W)$ – ошибка сети на всей обучающей выборке.

Тогда задачу обучения нейронной сети можно интерпретировать следующим образом: найти вектор W – такой, что $E(W) \rightarrow \min$ (обучение на всей выборке [1]). Обозначим функцию ошибки сети на всей обуча-

ющей выборке как $f(W)$. Тогда решением задачи будет подбор таких параметров W , при которых функция $f(W)$ достигает своего минимума. Приведение параметров к нужному виду осуществляется путем последовательных итераций с изменением параметров по определенному правилу $W_{i+1} = z(W_i)$, где z – некоторое преобразование.

Классический подход к задаче минимизации функции потерь. Для дифференцируемых функций существует стандартный подход к задаче оптимизации обучающего алгоритма нейронных сетей при помощи машинного обучения – применение метода градиентного спуска, суть которого заключается в нахождении локального экстремума функции с помощью движения вдоль градиента [4, 5]. Особенность метода состоит в выполнении нескольких итераций обновления параметров W . Правилем обновления параметров является некая параметризованная функция, определяющая порядок сопоставления значений параметров на i -ой итерации t с их значениями на предшествующей $(t-1)$ -ой итерации. В соответствии с методом градиентного спуска находится локальный минимум функции потерь, по правилу обновления параметров при этом из параметра W_i вычитается градиент функции потерь по этому параметру $\nabla f(W_i)$, умноженный на подобранное вручную число ε , которое отображает скорость обучения.

Алгоритм классического градиентного спуска имеет следующий вид [6].

1. Инициализация вектора параметров W_i случайным значением из множества R^n ;
2. Присвоение значения номера итерации на первом шаге: $i=1$;
3. Применение правила обновления параметров: $W_{i+1} = W_i - \varepsilon \nabla f(W_i)$;
4. Инкрементирование значения номера итерации: $i++$;
5. Прерывание выполнения алгоритма в случае, если очередной шаг не вызвал существенного улучшения решения:

if $f(W_i) - f(W_{i+1}) > c$ *goto* 3.

Данное правило обновления использует вычисленные значения градиентов, но игнорирует информацию второго порядка – кривизну целевой функции. В связи с этим эффективность данного правила нельзя считать удовлетворительной. Классические методы оптимизации градиентного спуска предлагают способ решения этой проблемы путем вычисления матрицы частных производных второго порядка.

Метод градиентного спуска позволяет найти один из локальных минимумов, который может не быть глобальным минимумом, но все же отчасти оптимизировать веса и уменьшить значение функции потерь.

Проектирование обучаемого оптимизатора. Модернизация правила изменения параметров. Модернизируем правило изменения параметров: в качестве способа вычисления таких параметров W^* , при которых функция $f(W^*)$ достигает минимума, определим последовательность итераций изменения параметров

W по смоделированному правилу, обученному на тренировочных данных, которое назовем оптимизатором g . Пусть t – номер шага оптимизации. Тогда правило обновления параметров оптимизируемой функции можно записать как $W_{t+1} = W_t + g_t(\nabla f(W_t), \phi)$ где ϕ – набор собственных параметров оптимизатора g . Входящим параметром для оптимизатора g является градиент оптимизируемой функции f по ее собственным параметрам W на шаге t . Оптимизатор возвращает обновление для параметров W (рис. 1).

Таким образом, модифицированный алгоритм градиентного спуска выглядит следующим образом:

1. Вычисление функции потерь $f(W_t)$, где t – номер шага обновления параметров оптимизируемой функции;
2. Вычисление градиента $f(W_t)$ по параметрам W_t ;
3. Обновление параметров с помощью оптимизатора g : $W_{t+1} = W_t + g_t(\nabla f(W_t), \phi)$;
4. goto 1.



Рисунок 1 – Получение оптимизатором данных о производительности функции и обновления оптимизируемой функции для повышения производительности

Использование рекуррентной нейронной сети в качестве оптимизатора. Необходимо, чтобы при вычислении актуального обновления параметров правило оптимизации использовало не только информацию первого порядка (текущий градиент по параметрам), но и полезную информацию, полученную в ходе предшествующих итераций. Такая возможность появляется при использовании рекуррентных нейронных сетей – сетей, которые могут использовать свою внутреннюю память для обработки последовательностей произвольной длины [7, 8]. Минусом базовой имплементации рекуррентных нейронных сетей является то, что они не способны обрабатывать долгосрочные зависимости, поэтому необходимо использовать подкласс рекуррентных сетей *LSTM*, способный запоминать значения как на короткие, так и на длинные промежутки времени [9]. Будем считать, что обновление g_t является выходом нейронной сети *LSTM* – параметризованной ϕ на шаге t . Состояние сети обозначим как h_t .

Обучение и реализация оптимизатора. Параметры оптимизируемой функции: $W^* = \text{argmin}_w f(W_t)$ можно выразить через функцию параметров оптимизатора

ϕ и оптимизируемую функцию f : $W^* = W^*(f, \phi)$. Чтобы обучить оптимизатор, необходимо иметь возможность вычислять производные функции потерь $L(\phi)$ по параметрам оптимизатора ϕ . Для этого необходимо развернуть процесс оптимизации во времени. Развертка может быть представлена в виде вычислительного графа, который состоит из итеративного применения оптимизатора для оптимизации параметров целевой функции. Вычисление градиентов для параметров оптимизатора включает в себя обратное распространение ошибки по данному развернутому вычислительному графу [10, 11]. Далее с помощью метода усеченного обратного распространения ошибки во времени вычисляем внешние градиенты на более коротких временных отрезках [12]. Для точного вычисления градиента необходимо воспроизвести обратное распространение ошибки по всем ребрам вычислительного графа без исключений. В реализации оптимизатора была использована двухслойная *LSTM* сеть с 20 скрытыми узлами на каждом слое. В качестве входного параметра нейронная сеть получает градиент оптимизируемой функции по одному параметру и скрытое состояние, соответствующее данному параметру. На выходе сеть выдает обновление для соответствующего оптимизируемого параметра (рис. 2).

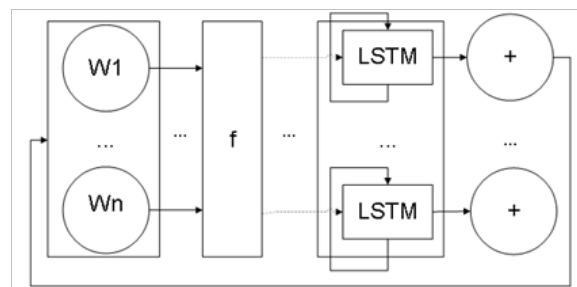


Рисунок 2 – Первая итерация используемого LSTM оптимизатора

В реализации оптимизатора используется высокоуровневый язык программирования *Python* с динамической строгой типизацией и автоматическим управлением памятью, в синтаксисе которого содержатся следующие библиотеки [13, 14,]:

– *NumPy* – поддерживает многомерные массивы и матрицы вместе с большой библиотекой высокоуровневых (и очень быстрых) математических функций для операций с этими массивами [16, 17];

– *Theano* – используется для быстрых численных вычислений, может быть запущена на *CPU* или *GPU*. Это ключевая базовая библиотека для глубокого обучения в *Python* [18];

– *Lasagne* – используется для создания и обучения нейронных сетей в *Theano*. Она поддерживает сети передачи данных, такие как сверточные нейронные сети (*CNN*), включая *LSTM* и любую их комбинацию [19, 20].

Заключение. В данной статье показано, как проектирование алгоритма оптимизации может быть представлено в качестве задачи машинного обучения, позволяющей алгоритму научиться использовать

структуру интересующих задач в автоматическом режиме. Отмечено, что благодаря использованию нейронной сети *LSTM* возможно реализовать модели оптимизаторов, эффективно работающие на конкретном классе оптимизационных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Зоткина А.А. Характеристики и математическое описание нейрона / Д.Э. Ильичов, Н.А. Лыццов, А.А. Зоткина // Наука и образование в современном обществе: актуальные вопросы и инновационные исследования: сборник статей III Международной научно-практической конференции. Пенза, 2021. – С. 28-30.
2. Зоткина А.А. Перцептрон как простейший вид искусственной нейронной сети на примере построения однослойной модели сети / А.А. Зоткина, А.И. Мартышкин // Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов: сборник статей XIX Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 60-летию первого полета в космос Юрия Алексеевича Гагарина. Под редакцией И.И. Сальникова. Пенза, 2021. – С. 33-38.
3. Машинное обучение [Электронный ресурс] – URL: http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Машинное_обучение (дата обращения: 19.10.2021).
4. Е.С.Борисов. О методах обучения многослойных нейронных сетей прямого распространения. Часть 3: Градиентные методы второго порядка [Электронный ресурс] – URL: <http://mechanoid.su/neural-net-backprop3.html> (дата обращения: 19.10.2021).
5. Marcin Andrychowicz, Misha Denil, Sergio Gomez, Matthew W. Hoffman, David Pfau, Tom Schaul, Brendan Shillingford, and Nando de Freitas. Learning to learn by gradient descent by gradient descent. In Advances in Neural Information Processing Systems, arXiv:1606.04474v2 [cs.NE], 30 Nov. 2016.
6. Sepp Hochreiter, Arthur Steven Younger and Peter R. Conwell. Learning to learn using gradient descent. International Conference on Artificial Neural Networks. ICANN 2001: Artificial Neural Networks — ICANN 2001 pp 87-94. DOI:10.1007/3-540-44668-0_13.
7. Зоткина А.А. Методы разработки искусственных нейронных сетей / Е.И. Маркин, И.А. Подопригора, А.А. Зоткина, Е.Г. Бершадская // Вестник современных исследований. – 2018. – № 3.1 (18). – С. 49-52.
8. A. Santoro, S. Bartunov, M. Botvinick, D. Wierstra, and T. Lillicrap. Meta-learning with memory-augmented neural networks. Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning, New York, NY, USA, 2016. JMLR: W&CP volume 48. [Электронный ресурс] – URL: <https://proceedings.mlr.press/v48/santoro16.pdf> (дата обращения: 19.10.2021).
9. Conrad Tiffin. LSTM Recurrent Neural Networks for Signature Verification, 2012. 104 p.
10. Зоткина А.А. Основные характеристики и алгоритм обучения нейронных сетей / Д.Э. Ильичов, Н.А. Лыццов, А.А. Зоткина // Наука и образование в современном обществе: актуальные вопросы и инновационные исследования: сборник статей III Международной научно-практической конференции. Пенза, 2021. – С. 25-27.
11. B. M. Lake, T. D. Ullman, J. B. Tenenbaum, and S. J. Gershman. Building machines that learn and think like people. arXiv Report 1604.00289, 2016.
12. D. P. Kingma and J. Ba. Adam: A method for stochastic optimization. In International Conference on Learning Representations, 2015.
13. Маккинни, У. Python и анализ данных / У. Маккинни; перевод с английского А. А. Слинкина. – 2-ое изд., испр. и доп. – Москва: ДМК Пресс, 2020. – 540 с.
14. Открытый курс машинного обучения. Тема 5. Композиции: бэггинг, случайный лес / Хабр [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/company/ods/blog/324402/> (дата обращения: 19.10.2021).
15. GitHub – deeprnpt/tdl: Course "Theories of Deep Learning" [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/deeprnpt/tdl> (дата обращения: 19.10.2021).
16. Учебник по библиотеке NumPy: учитесь на примерах [Электронный ресурс]. – URL: <https://pythonist.ru/uchebnik-po-biblioteke-numpy-uchites-na-primerah/> (дата обращения: 21.10.2021).
17. Учебник по NumPy - Визуализация примеров для быстрого изучения [Электронный ресурс]. – URL: <https://python-scripts.com/numpy> (дата обращения: 19.10.2021).
18. GitHub - PacktPublishing/Deep-Learning-with-Theano: Deep Learning with Theano, published by Packt [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/PacktPublishing/Deep-Learning-with-Theano> (дата обращения: 19.10.2021).

19. Библиотеки для глубокого обучения Theano/Lasagne / Хабр [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/company/ods/blog/323272/> (дата обращения: 19.10.2021).

20. Welcome to Lasagne – Lasagne 0.2. dev1 documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://lasagne.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 19.10.2021).

Статья поступила в редакцию 28.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 004.42, 378.4

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0004

КОНЦЕПЦИЯ УДАЛЕННОГО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО КОМПЬЮТЕРНЫМ ДИСЦИПЛИНАМ

©2021

Смолянов Андрей Григорьевич, кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой фундаментальной информатики,

Куляшова Наталья Михайловна, кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры фундаментальной информатики

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва
(430005, Россия, г. Саранск, улица Большевикская, д. 68, e-mails: mgutech@mail.ru, kafivt@mail.ru)*

Аннотация. Авторы затрагивают процессы развития дистанционного образования в России в связи с пандемией коронавирусной инфекции, проблемы и возможности онлайн-обучения в современных условиях в высшей школе. Необходимость перехода ВУЗов России на онлайн-обучение привела к активному обсуждению в образовательном сообществе проблемы цифровой трансформации учебных курсов, пересмотра методик преподавания различных дисциплин, переосмысления ролей преподавателя и обучаемого в учебном процессе. В рамках данного этапа исследований рассматривались следующие цели: выявить возможности цифровой трансформации образовательного процесса для конкретных дисциплин компьютерной направленности; обосновать эффективность применения такой трансформации на примере конкретной дисциплины; показать преимущества предложенного варианта организации учебного процесса на примере постановки лабораторного курса дисциплины «Базы данных» по сравнению с традиционным подходом к обучению. К задачам настоящего исследования можно отнести: анализ традиционного подхода к постановке лабораторных курсов компьютерных дисциплин; выявление процессов, замедляющих ход учебного процесса и приводящих к потере рабочего времени преподавателя и студента на лабораторных занятиях; установление процессов взаимодействия преподавателя и студента на занятии, которые могли бы быть эффективно реализованы с помощью ЭВМ на решение различных организационных вопросов, в том числе, отчетов студентов по выданным лабораторным работам; разработку концепции информационной системы, призванной существенно оптимизировать процессы взаимодействия преподавателя и студента на лабораторных занятиях по дисциплине «Базы данных». В рамках исследования разрабатывается и обсуждается структура информационной системы для создания электронного хранилища лабораторных заданий и организации автоматизированного сбора, хранения и обработки решений студентов на лабораторных занятиях любого формата – очного или дистанционного.

Ключевые слова: образование, дистанционное обучение, цифровая трансформация образовательного процесса, информационная система, автоматизированная проверка лабораторных заданий, база данных.

THE CONCEPT OF A REMOTE LABORATORY PRACTICE ON COMPUTER DISCIPLINES

©2021

Smolyanov Andrey Grigorievich, candidate of physical and mathematical sciences,
head of the Department of Fundamental Informatics

Kulyashova Natalia Mikhailovna, candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor of the Department of Fundamental Computer Science

*National Research Mordovia State University named after N.P. Ogarev
(430005, Russia, Saransk, street Bolshevik, 67, e-mails: mgutech@mail.ru, kafivt@mail.ru)*

Abstract. The authors touch on the development of distance education in Russia in connection with the coronavirus pandemic, problems and opportunities for online education in modern conditions in higher education. The need for Russian universities to switch to online education led to an active discussion in the educational community of the problem of digital transformation of training courses, revision of teaching methods of various disciplines, rethinking the roles of the teacher and the student in the educational process. Within the framework of this stage of research, the following goals were considered: to identify the possibilities of digital transformation of the educational process for specific computer disciplines; justify the effectiveness of the application of such a transformation on the example of a specific discipline; to show the advantages of the proposed option for organizing the educational process on the example of setting up a laboratory course for the discipline "Databases" in comparison with the traditional approach to teaching. The objectives of this study include: analysis of the traditional approach to the formulation of laboratory courses in computer disciplines; identification of processes that slow down the course of the educational process and lead to the loss of working time of the teacher and student in laboratory classes; establishing the processes of interaction between the teacher and the student in the classroom, which could be effectively implemented with the help of a computer to solve various organizational issues, including student reports on laboratory work issued; development of the concept of an information system designed to significantly optimize the processes of interaction between a teacher and a student in laboratory classes in the discipline "Databases". As part of the study, the structure of an information system is

being developed and discussed for creating an electronic storage of laboratory assignments and organizing automated collection, storage and processing of students' decisions in laboratory classes of any format - face-to-face or remote.

Keywords: higher education, distance learning, coronavirus pandemic, digital transformation of the educational process, information system, automated verification of laboratory tasks, database.

Введение. Мировая система образования, особенно высшая школа, вынуждена адаптироваться к вызовам времени – пандемии коронавируса, расширяя масштабы применения технологии дистанционного обучения [1]. Еще в марте 2020 года был издан приказ «Об организации образовательной деятельности в организациях, реализующих образовательные программы высшего образования и соответствующие дополнительные профессиональные программы, в условиях предупреждения распространения новой коронавирусной инфекции на территории Российской Федерации», регламентирующий переход на дистанционный формат обучения, затронувший свыше 4 миллионов студентов и более 230 тысяч преподавателей. Безусловно, к этому времени школами и ВУЗами России был накоплен определенный потенциал дистанционных технологий [2-7], разработана объемная методологическая база. Важно заметить, что дистанционное обучение прежде рассматривалось как инструмент реализации заочного обучения, о массовом уходе в онлайн до последнего времени речь не шла, как и о массовой подготовке действующих педагогов к применению таких технологий обучения. Тем не менее, высшая школа организованно и оперативно отреагировала на изменившиеся условия, чему способствовало наличие опыта применения дистанционных технологий.

Сегодня в научном сообществе активно обсуждаются вопросы трансформации высшего образования [8], переоценки роли цифровых технологий в практике преподавания при вынужденном переходе на дистанционное обучение в условиях пандемии [9-11]. Актуальной стала также адаптация профессорско-преподавательского состава к цифровым сервисам и удаленным платформам [12]. Так, социологический опрос почти 35 тысяч преподавателей, проведенный РАНХиГС в апреле 2020 года показал, в частности, что «... сейчас нет ни одного направления подготовки, представители которого поддерживали бы и продвигали дистанционное образование среди преподавателей» [13]. Такой результат можно объяснить целым рядом причин технического характера и низкой компетентностью многих представителей профессорско-преподавательского состава, не готовых к наполнению и массовому использованию электронного образовательного контента. В непростой ситуации оказались некоторые провинциальные ВУЗы, отстающие в цифровом развитии от столичных университетов. Выяснилось также, что использование в учебном процессе разных онлайн-платформ и разнообразных форм проведения занятий приводит к увеличению нагрузки и преподавателей, и студентов. Один из опросов, проведенный Всероссийским центром изучения общественного мнения в мае 2020 года, показал, что

из 800 студентов каждый второй сообщил о возрастании учебной нагрузки, а увеличение нагрузки на преподавателей в связи с переходом на дистанционный формат обучения обнаружили 55% опрошенных [14]. При этом отмечалось, что рост нагрузки обусловлен не только возросшей продолжительностью подготовки учебных ресурсов в новом формате, но и дополнительными затратами времени на проверку работ студентов. Много нареканий вызывает, в частности, формат сдачи отчетов в виде фотографий. Естественно, что большинство участников учебного процесса не находят дистанционный формат удобным и комфортным.

С другой стороны, переход в онлайн режим позволяет повысить степень индивидуализации, вариативности обучения по содержанию, форме изложения материала и аттестации. Студент может выбрать ту скорость и последовательность изучения материала, которые ему больше подходят, повторять или пропускать некоторые фрагменты учебного материала, проходить тестирование в режиме тренажера или тестироваться в рамках текущего контроля знаний. Подготовка электронного контента требует от преподавателей серьезного осмысления методологии построения курсов, не ограничивающейся оцифровкой традиционных лекций, созданием автоматизированной системы тестирования по сканам выполненного задания.

Несмотря на многочисленные проблемы, с развитием сервисов и средств коммуникаций в сети Интернет в арсенале дистанционного обучения появляются новые успешные методы и приемы для эффективной работы с удаленными обучающимися. В рамках данной работы авторами преследовались следующие цели: выявить возможности цифровой трансформации образовательного процесса для конкретных дисциплин компьютерной направленности; обосновать эффективность применения такой трансформации на примере конкретной дисциплины. Для достижения этих целей необходимо провести анализ традиционного подхода к постановке лабораторного практикума компьютерных дисциплин; выявить причины потерь рабочего времени преподавателя и студента в ходе лабораторных занятий; усовершенствовать методологию компьютерного взаимодействия преподавателя и студента вплоть до отчетов студентов по выполненным лабораторным работам. Решение поставленных задач предполагает разработку новой концепции информационной системы для сопровождения лабораторных занятий, призванной оптимизировать процессы взаимодействия преподавателя и студента.

Материалы и методы исследования. Цифровые трансформации образовательного процесса и развитие дистанционных технологий, с одной стороны, об-

речены на интенсивное развитие ввиду происходящих интеграционных процессов в мировом образовательном пространстве, а неожиданная пандемия, с другой стороны, показала, что в подобных условиях альтернативы дистанционному обучению просто нет.

Цифровая трансформация учебного процесса – это комплекс конкретных мероприятий, организационных решений, методических материалов, средств технической поддержки и программного обеспечения. Очевидно, не каждая учебная дисциплина может быть достаточно просто представлена в цифровом формате. Для определенности в качестве примера дисциплины, отдельные разделы которой могут быть эффективно оцифрованы, ниже рассматривается дисциплина «Базы данных» – общетехническая дисциплина, преподаваемая на многих естественных и технических направлениях бакалавриата, магистратуры и специалитета. Важное место в ней занимает раздел, связанный с изучением основ языка *SQL*. Наиболее простой вариант программной поддержки учебного процесса в этом случае – обычный локальный сервер. Таких систем класса *freeware* имеется в настоящее время достаточно много – *Denwer*, *OpenServer*, *WampServer* и другие.

Функциональные возможности известных систем довольно ограничены, в частности, они не позволяют в полной мере автоматизировать проверку решений компьютерных задач в рамках выполненных лабораторных исследований как в очном так и в дистанционном форматах. Обзор современных публикаций демонстрирует интерес исследователей к этой нетривиальной теме. Одни публикации посвящены вопросам автоматизации проверки решений задач по программированию на соревнованиях и олимпиадах [15-17], другие – вопросам текущего контроля знаний обучающихся в ходе учебного процесса [18-19], третьи – практическим аспектам применения систем тестирования при обучении программированию [20]. Однако, комплексного решения задач хранения заданий, автоматизированного сбора, хранения и обработки отчетов студентов по лабораторным работам пока не предложено.

Авторами предпринята попытка устранить этот пробел, для чего проработана возможная структура информационной системы для сопровождения удаленного лабораторного практикума, включающей рабочее место преподавателя и студента. Компоненты системы показаны на рисунке 1.

Центральное место в этой системе отводится хранилищу лабораторных заданий, которое аккумулирует опыт преподавателей по практическим аспектам изучаемых разделов дисциплины. Каждое задание в хранилище представлено текстовыми и графическими материалами, описывающими предметную область и поясняющие тему задания, постановку учебной задачи, исходные данные для её решения и некоторые другие характеристики. Решение каждого задания оценивается в баллах, которые могут назначаться индивидуально или конкретной группе студентов.

Электронное представление лабораторного задания упрощает последующую автоматизированную оценку решения студента с учетом ряда критериев: способа решения задачи в рамках темы, правильности полученного результата и его оформления. Степень соответствия решения установленным критериям определяется системой, автоматически уменьшающей результирующие баллы по каждому выявленному несоответствию.

Блок администрирования позволяет структурировать списки студентов по учебным годам, направлениям подготовки и академическим группам (подгруппам). В этом блоке студентам назначаются логины и пароли, необходимые для аутентификации в системе.

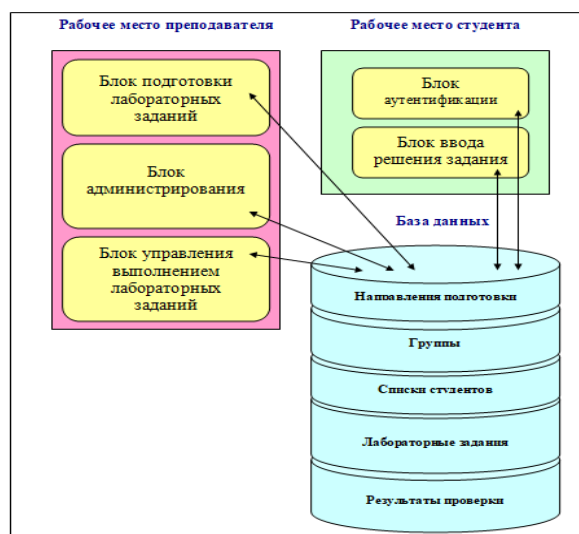


Рисунок 1 – Структура информационной системы

Блок управления выполнением лабораторных заданий осуществляет следующие функции:

- введение данных о контингенте обучающихся;
- разрешение начала работы для студентов выбранного контингента;
- назначение лабораторных заданий группе (подгруппе);
- выдача индивидуальных заданий;
- закрытие сеанса работы студентов выбранного контингента;
- просмотр результатов выполнения лабораторных заданий;
- формирование документов с результатами выполнения заданий;
- визуализация контроля присутствия студента в системе;
- обмен сообщениями (чат) между студентом и преподавателем.

Перечисленные функции относятся к компетенции преподавателя и образуют его рабочее место.

Рабочее место студента в системе представлено одним программным модулем, функции которого реализуют следующие возможности:

- аутентификация студента;
- выбор одного задания из назначенных заданий;
- выгрузка базы данных для выбранного задания;

- ввод решения лабораторного задания;
- проверка решения и запись результатов в хранилище данных;
- обмен сообщениями (чат) между студентом и преподавателем;
- просмотр студентом результатов оценки своих решений в личном кабинете.

Все блоки системы активно взаимодействуют с рабочей базой данных, которая поддерживает хранение сведений о направлениях подготовки, группах, списка входящих в группу студентов, лабораторных заданий и результатов их решения студентами. Все хранящиеся в базе данных сведения (кроме лабораторных заданий) привязываются к определенному учебному году.

Результаты исследования. Работа преподавателя в традиционном формате (офлайн) по дисциплине «Базы данных» весьма трудоемка. К примеру, если в группе 20 студентов, которым в течение семестра будет предложено 40 лабораторных заданий, преподавателю потребуется 800 контактов для проверки выполненных заданий при неочевидном условии, что одно задание требует одного обсуждения. С учетом возможных дополнительных корректировок отчетов число контактов может выйти за указанные рамки. Особенность постановки обсуждаемой части учебного курса состоит в том, что задания выдаются всем студентам одновременно в начале занятия, каждый студент должен отчитаться по их выполнению до окончания занятия. При традиционном подходе об эффективной организации учебного процесса в подобной ситуации не может быть и речи.

Ожидается, что предлагаемая структура информационной системы позволит усовершенствовать организацию дистанционного учебного процесса и повысить качество обучения ввиду очевидных достоинств:

- система позволяет устранить временные издержки, связанные с общением преподавателя со студентом, регистрацией факта выполнения заданий, фиксацией несоответствий предложенного решения установленным критериям;
- оценивание решений студентов становится гораздо более объективным;
- участие объективного посредника между студентом и преподавателем мобилизует студента на работу, заставляя его сосредоточиться на предложенных заданиях и отнестись к их выполнению более ответственно;
- обеспечивается возможность обсуждения работы студента в любое удобное для студента и преподавателя время (в том числе за рамками запланированного времени занятия);
- фиксация даты и времени для всех решений студентов, которые могут быть представлены электронными документами (отчетами);
- любому студенту может быть представлена возможность выполнить лабораторные работы позже, если по каким-то причинам он не смог выполнить их в течение запланированного времени;
- возможность реализации индивидуальной обра-

зовательной траектории путем выдачи индивидуальных заданий во время проведения планового занятия в группе;

- возможность доступа преподавателя к результатам выполнения всех лабораторных работ с любого компьютера, имеющего выход в Интернет;
- учебный процесс, несомненно, становится интересным и соревновательным;
- система одинаково эффективна как в очном, так и в дистанционном формате работы.

Заключение. Переход к различным формам дистанционного обучения требует переоценки статуса и роли преподавателя в учебном процессе, переработки и адаптации образовательных программ и их дисциплин к современным реалиям, переосмысления множества организационных моментов реализации онлайн курсов, развития различных средств информационной поддержки учебной работы преподавателей.

Накопленный за короткий исторический период опыт показывает, что дистанционные технологии естественным образом вписываются в образовательные программы без нарушения баланса традиционного очного и дистанционного форматов обучения. В связи с общим трендом на цифровую трансформацию образовательного процесса предлагаемая авторами структура информационной системы способна создать комфортные условия для всех участников учебного в части проведения лабораторных занятий по дисциплинам, в которых компьютер является основным инструментом исследований. Предоставляя всем студентам равные условия, система дает в то же время возможность задавать индивидуальные траектории обучения – слабому студенту предлагать более простые задания с меньшими баллами оценки, а сильному студенту – сложные задания, способствующие развитию его творческих навыков. Использование системы делает занятия более интересными, соревновательными, соответствующими духу времени.

К моменту написания статьи основные элементы предложенной структуры информационной системы реализованы с помощью стандартного набора инструментов *web*-программиста *HTML*, *CSS*, *JavaScript*, *PHP*. Система развернута и работает под управлением *web*-сервера *Apache HTTP Server*. Администрирование системы сводится к внесению и удалению списков направлений подготовки, академических групп, студентов, логинов и паролей. Все рабочие функции доступны пользователям – преподавателям и студентам в процессе проведения лабораторных занятий по дисциплинам, требующим лишь подключенного к Интернету компьютера с любым браузером.

В настоящее время система проходит испытания на факультете математики и информационных технологий ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» при изучении дисциплины «Базы данных» с целью практической оценки ее эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Андреев А.А. Дистанционное обучение и дистанционные образовательные технологии / А.А. Андреев // Открытое

образование. – 2013. – № 5(100). – С. 40–46.

2. Педагогические технологии дистанционного обучения: учебное пособие для вузов. Под ред. Е.С. Полат. 3-е издание. – М.: Издательство Юрайт, 2020. – 392 с.

3. Теория и практика дистанционного обучения: учебное пособие для вузов. Под редакцией Е.С. Полат. 2-е издание. – М.: Издательство Юрайт, 2020. – 434 с.

4. Научная школа А.В. Хуторского [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://khutorskoy.ru/science/>. (Дата обращения: 01.07.2021).

5. Научная школа МИМ ЛИНК [Электрон. ресурс]. Режим доступа: https://www.mimlink.ru/about_institute/science/ (Дата обращения: 01.07.2021).

6. Научная школа НТУ «Харьковский политехнический институт» (Украина) [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://dl.khpi.edu.ua/mod/page/view.php?id=12445&fbclid=IwAR1wYVVVMXtdhyXzI-1BUm6BSd05Vx7TZc-Kn7KgzeDqV11yM-PoZycXруM> (Дата обращения: 01.07.2021)

7. Научная школа Майкла Г. Мура (США) [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://window.edu.ru/resource/043/71043/files/3214647.pdf>. (Дата обращения: 03.07.2021)

8. Гафуров, И.Р. Трансформация обучения в высшей школе во время пандемии: болевые точки / И.Р. Гафуров, Г.И. Ибрагимов, А.М. Калимуллин, Т.Б. Алишев // Высшее образование в России. – 2020. – № 10. – С. 101–112.

9. Альтбах, Ф. Дж. Информационные технологии в контексте COVID-19: поворотный момент? / Ф. Дж. Альтбах, Ханс де Вит // Международное высшее образование. – М.: НИУ ВШЭ, 2020. – № 103. – С. 6–8.

10. Ольховая Т.А., Новые практики инженерного образования в условиях дистанционного обучения / Т.А. Ольховая, Е.В. Пояркова // Высшее образование в России. – 2020. – Т. 29. № 8/9. – С. 142–154.

11. Алешковский И.А. Студенты вузов России о дистанционном обучении: оценка и возможности / И.А. Алешковский, А.Т. Гаспаршвили, О.В. Крухмалева // Высшее образование в России. – 2020. – № 10. – С. 76–91.

12. Маликов А.В. Адаптация профессорско-преподавательского состава вузов к вызовам цифровой экономики / И.И. Потапова, Е.С. Гаврилюк // Креативная экономика. – 2020. – Т. 14. № 6. – С. 1011–1020.

13. Преподаватели российских вузов о развитии онлайн-среды в условиях пандемии [Электрон. ресурс]. Режим доступа: https://www.ranepa.ru/documents/2020_14-116_May.pdf. (Дата обращения: 08.07.2021).

14. Выпускники школ и студенты высказали мнение о дистанционном образовании [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://wciom.ru/index.php?id=236&uid=10304>. (Дата обращения: 08.07.2021).

15. Гаспарян А.В., Особенности автоматизации проверки задач по программированию / А.В. Гаспарян, Н.В. Тимошина // ИТпортал. – 2018. – №2 (18). URL: <http://itportal.ru/science/tech/osobennosti-avtomatizatsii-proverki/> (Дата обращения: 10.07.2021).

16. Макиева З.Д. Проектирование автоматизированной системы проверки олимпиадных заданий по программированию // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2016. – № 2 (38). – С. 54–61. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_26586246_50941598.pdf (Дата обращения: 12.07.2021).

17. Русакова М.С. Проектирование системы автоматизированной проверки решений для проведения соревнований по программированию / М.С. Русакова, Р.И. Меерсон // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия. – 2013. – № 3 (104). – С. 206–218. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_19062501_93608376.pdf (Дата обращения: 18.07.2021).

18. Рогачева Е.В. Опыт использования систем автоматизированной проверки решений при обучении программированию // Высшая школа. – 2015. – № 9. – С. 55–58.

19. Лучанинов Д.В. Использование автоматизированной системы обучения программированию для организации самостоятельной работы студентов / Д.В. Лучанинов, Р.И. Баженов, А.П. Дмитриев, А.О. Кизянов // Мир науки. Педагогика и психология. – 2020. – №5. URL: <https://mir-nauki.com/PDF/77PDMN520.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. (Дата обращения: 26.07.2021).

20. Гладких И.Ю. Системы автоматизированного тестирования по программированию в образовательном пространстве [Электрон. ресурс] / И.Ю. Гладких, А.В. Якушин // Современные проблемы науки и образования. – 2016. – № 3. – С. 326. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_27206188_20623452.pdf (Дата обращения: 08.08.2021).

Статья поступила в редакцию 29.09.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 004.946

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0005

ОСОБЕННОСТИ ВОСПРИЯТИЯ ЛЁТЧИКАМИ ИНФОРМАЦИИ ОТ ИМИТАТОРОВ АВИАЦИОННОГО ТРЕНАЖЁРА ПРИ РЕШЕНИИ НАВИГАЦИОННЫХ ЗАДАЧ

©2021

Роганов Владимир Робертович, к.т.н., доцент кафедры «Информационные технологии и системы»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: vladimir_roganov@mail.ru)

Аннотация. Как правило, комплексные авиационные тренажёры разрабатываются для обучения лётчиков профессиональному пилотированию летательного аппарата в «особых случаях полёта». Такой подход был обусловлен как необходимостью обучать лётчика на земле профессиональным навыкам пилотирования летательного аппарата в ситуациях, воспроизведение которых в реальном полёте нежелательно, но навыки действий лётчика в таких ситуациях необходимы, так и развитием науки и техники. В частности, до сегодняшнего дня Заказчик предъявляет высокие требования к моделированию района местности размером не более 15×15 км, в центре которого находится узнаваемая модель ВПП, при возможном районе полётов над моделью местности размером 1500×1500 км. Для отработки профессиональных навыков управления летательным аппаратом при заходе на посадку на узнаваемую модель ВПП такой подход был оправдан. Вследствие этого значительная часть компьютерных генераторов изображения, являющихся основным узлом имитатора визуальной обстановки, разрабатывалась с производительностью около 64000 полигонов за такт режима реального времени и соответствующей ёмкостью памяти. Это обеспечивало учебные полёты на авиационном тренажёре – сначала взлёт с модели ВПП, после набора «высоты» модель летательного аппарата входит в модель плотной облачности и дальнейший полёт проводится по приборам. После четвёртого разворота модель летательного аппарата «выходит» из облачности и далее лётчик совершенствует свои навыки визуальной посадки. В настоящее время достижения науки и техники позволили сделать доступными как компьютерные генераторы изображения с более высокой производительностью (более 300000 обрабатываемых примитивов) и более высокой ёмкостью оперативной памяти, позволяющей хранить базу данных с детальным описанием моделей реперных объектов по всему возможному району полётов. Это позволяет разрабатывать комплексные тренажёры с обучением лётчика решению навигационных задач при полёте по маршруту с ориентацией по визуально наблюдаемым моделям реперных объектов. Эта же задача актуальна для тренажёра оператора беспилотного летательного аппарата. В этом случае лётчик решает навигационные задачи по информации от приборов кабинного оборудования, от имитатора радиолокатора, имитатора тепловизора и имитатора визуальной обстановки. Целью данной статьи является исследование особенностей восприятия лётчиками информации, синтезируемой имитаторами авиационного тренажёра, необходимой для решения навигационных задач.

Ключевые слова: имитатор, авиационный тренажёр, обучение, самолётовождение

FEATURES OF PERCEPTION WITH RATERS OF INFORMATION FROM SIMULATORS OF THE AVIATION SIMULATOR WHEN SOLVING NAVIGATION PROBLEMS

© 2021

Roganov Vladimir Robertovich, PhD, associate professor

of the Department "Information Technologies and Systems"

Penza State Technological University

(440039, Penza, Baidukov's passage / ul. Gagarin, 1A / 11, E-mail: vladimir_Roganov@mail.ru)

Abstract. As a rule, complex aviation simulators are developed for teaching pilots to professional piloting of the aircraft in "special cases of flight". Such an approach would be due to the need to prepare a pilot on Earth by professional piloting skills of the aircraft in situations, the reproduction of which in real flight is undesirable, but the skills of the pilot's action in such situations are necessary and the development of science and technology. In particular, until today, the Customer presents high demands on the modeling of the area of the area of no more than 15 × 15 km in the center of which there is a recognizable model runway, with a possible area of flights over a locality model of 1500 × 1500 km. To work out professional skills of control of the aircraft while entering the recognizable WFP model, this approach was justified. As a consequence, a significant part of computer generators of the image, which are the main node of the simulator of the visual environment, was developed with a capacity of about 64,000 damaged polygons for the tact of real-time modes and the corresponding memory capacity. This provided training flights at the aviation simulator - takes off from the model runway, then the model of the aircraft enters the model of dense cloudiness and the further flight is carried out according to the instruments. After the fourth reversal, the model of the aircraft "comes out" from the cloudiness and then the pilot improves its visual landing skills. Real at the end of the takeoff (height). Currently, to store the achievement of science and technology, they have made accessible as computer generators of images with higher performance (more than 300,000 prepared primitives) and a higher rapid memory capacity that allows you to store a database with a detailed description of models of reference objects throughout the possible field of flights. This allows you to develop integrated simulators with a pilot learning to solve navigation tasks when flying along a route with

orientation on visually observed models of reference objects. The same task is relevant for the simulator of the unmanned aircraft operator. In this case, the pilot solves navigation tasks according to information from the instruments of cabin equipment, from the imitator of the radar, the imitator of the thermal imager and the simulator of the visual environment. The purpose of this article is to study the requirements for information synthesized by the aviation simulator simulators necessary to solve navigation problems.

Keywords: simulator, flight simulator, training, aircraft driving.

Введение. Появление авиационных тренажёров (АТ) было вызвано необходимостью обучать лётчиков профессиональным навыкам управления летательными аппаратами (ЛА) в особых случаях полёта (как например взлёт и посадка на ВПП, пилотирование при частичном отказе оборудования, пилотирование в сложных метеоусловиях) [1]. В настоящее время АТ разрабатывается для освоения летным составом в наземных условиях образцов авиационной техники, повышения квалификации, исследований, подготовки к полетам и тренировки [2]. Или в случаях, которые вероятны, но обучение лётчика в таких условиях на реальных ЛА нежелательно, так как неподготовленность лётчика может во время отработки действий по выводу ЛА из предаварийной ситуации привести к катастрофе [3]. Анализ катастроф и предпосылок к лётным происшествиям позволил составить список учебных ситуаций [4], который в настоящее время постоянно пополняется и в соответствии с ним составляются ТЗ на АТ, чтобы прививать лётчику необходимые навыки управления летательным аппаратом. Такой подход послужил основанием в первую очередь разработать и успешно эксплуатировать пилотажные и комплексные авиационные тренажёры, тренажёры космических кораблей, сохраняя жизни пилотов и пассажиров ЛА [5]. Он же послужил основанием для разработки имитаторов АТ, синтезирующих для лётчика информацию о поведении модели ЛА в зависимости от заданных лётчиком управляющих воздействий на имитаторы органов управления [6]. Возможности разработанных имитаторов АТ базировались на технических характеристиках используемых счётно-решающих устройств – от аналоговых вычислителей (типа МН17) [7] до первых управляющих ЭВМ (типа СМ2) [8]. Всегда, при разработке АТ, отдельно стояла задача синтеза визуально наблюдаемой модели узнаваемого участка земной поверхности, видимой через остекление кабины АТ, на экране имитатора тепловизора или на экране имитатора радиолокатора [9]. Синтез изображения преследовал две цели – обучение визуальной посадке на ВПП и обучение решению навигационных задач с визуальным контролем пролёта реперного объекта. Решение последней задачи затруднялось: недостаточным исследованием методов синтеза узнаваемого местности большого размера 1500×1500 км [10], ограниченной производительностью используемых вычислителей [11] и особенностями отображения синтезированного изображения с помощью различных устройств индикации [12]. Развитие науки и техники открыло новые возможности синтеза визуально узнаваемого изображения местности, наблюдаемой лётчиком через остекление кабины и

на экранах приборов кабинного оборудования. В настоящее время решение задачи синтеза визуально наблюдаемой узнаваемой модели заданного района полётов во многом ограничивается отсутствием научно обоснованных требований к таким имитаторам, при нереализованной в настоящее время, но необходимой задаче обучать лётчика решению задач самолётовождения при полёте по маршруту с ориентацией по визуально наблюдаемым моделям реперных объектов. Эта задача становится ещё более актуальной при разработке тренажёров операторов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Целью статьи является исследование особенностей синтеза информации имитаторами АТ позволяющими лётчику решать навигационные задачи и формировать у него составляющие когнитивной модели восприятия визуально получаемой от соответствующих имитаторов информации о перемещении модели ЛА в модели пространства.

Материалы и результаты исследования. Обучение решению навигационных задач на АТ предполагает решение двух взаимосвязанных задач. Первая – разработка модели трёхмерного окружающего пространства, достаточной для решения навигационных задач. Вторая – разработка трёх имитаторов, синтезирующих визуально наблюдаемые изображения этой модели: имитатора визуальной обстановки (позволяющего подготовленному человеку видеть трёхмерное изображение модели окружающей среды через остекление кабины АТ [13]); имитатора тепловизора (позволяющего человеку видеть модель окружающей среды в инфракрасном диапазоне (ИК-модель) на экране имитатора тепловизора [14, 15]); имитатора радиолокатора (позволяющего человеку видеть модель окружающей среды в радиодиапазоне на экране имитатора радиолокатора [16, 17]). Так как полную модель создать невозможно [18], то невозможно во время полёта на АТ в t_i момент времени, от каждого n -го имитатора АТ, синтезирующего информационный процесс (ИП), получать информацию $I_n^{(AT)}(t_i)$, полностью аналогичную информации $I_n^{(ЛА)}(t_i)$, получаемой от узлов ЛА. Любой имитатор АТ всегда кроме истинной информации $I_n^{(AT)}(t_i)^+$ синтезирует ложную информацию $I_n^{(AT)}(t_i)^-$. При разработке АТ Заказчик задаёт учебные ситуации, при которых

$$I_n^{(AT)}(t_i) \approx I_n^{(ЛА)}(t_i)$$

и можно пренебречь незначительными отклонениями

$$\Delta I_n(t_{\alpha i}) = |I_n^{(AT)}(t_i) - I_n^{(ЛА)}(t_i)| \rightarrow 0.$$

Причиной появления «ложной информации» $I_n^{(AT)}(t_i)^-$ является несовершенство математических моделей, синтезирующих $I_n^{(AT)}(t_i)$ и технических характе-

ристик применяемых оптико-программно узлов [19], что в итоге сказывается на возможности конкретного человека при полётах на АТ воспринимать $I_n^{(AT)}(t)$ для профессионального совершенствования определённых составляющих его когнитивной модели (КМ), в которой откладывается весь его опыт $C_j^{(M)}n$ по решению поставленных задач.

Исследования особенностей синтеза ИП различными имитаторами позволили классифицировать их по способности участвовать в формировании $C_j^{(M)}n$. Проводился анализ только тех имитаторов, которые позволяют обучать лётчика решению навигационных задач.

К первой группе отнесём группу имитаторов числом K_p , синтезирующих информацию (обозначим её индексом (1)) $I_n^{(AT)}(t)^{(1)}$, которую лётчик должен воспринимать как абсолютно истинную. Например, показания имитатора воздушной скорости [20]. В этом случае, формирование составляющих $C_j^{(M)}n$, отвечающих за обучение чтению $I_n^{(AT)}(t)^{(1)}$, сводится к обучению лётчика найти панель соответствующего прибора кабинного оборудования и правильно прочесть его показания.

$$I_k^{(AT)}(t_n)^{(1)}, I_k^{(AT)}(t_{n+\Delta t_n})^{(1)}, I_k^{(AT)}(t_{n+2\Delta t_n})^{(1)}, \dots, k=1..K_p$$

Соответствующие составляющие $C_j^{(M)}n$, отвечающие за получение информации от этой группы формируются у лётчика при каждом полёте на АТ или на реальном ЛА, а также во время предполётной подготовки. Для решения навигационных задач лётчик от имитаторов первой группы получает информацию о воздушной и путевой скорости, высоте полёта, углах сноса, которая позволяет как и в реальном полёте определить место положения модели ЛА в модели пространства $\Theta(I_d^{(1)}(t_n))$, используя те же методы.

Каждый k -ый имитатор первой группы синтезирует ИП

$$I_k^{(AT)}(t_n)^{(1)}=F_k^{(1)}(t_n, x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots)$$

о работе k -ого узла ЛА по алгоритмам $F_k^{(1)}$, реализующим математические модели, описывающие физические процессы с параметрами $x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots$, протекающие в k -ом узле ЛА. Суммарный ИП от имитаторов первой группы $I^{(AT)}(t_n)^{(1)} = \sum_{k=1}^{K_1} I_k^{(AT)}(t_n)^{(1)}$ позволяет j -му лётчику, обрабатывая его, оценивать возможности ЛА к маневрированию. При этом у j -го лётчика формируются составляющие его КМ $C_{mj}^{(1)}$ с навыками пилотирования ЛА и частично самолётовождения.

$$C_{mj}^{(1)}=E_{mj}^{(1)}(T_{mj}, I_k^{(1)}) \quad (1)$$

где $E_{mj}^{(1)}$ – функция j -го лётчика воспринимать ИП в m -ой ситуации,

T_{mj} – время налёта j -го лётчика в ситуации, определённой как m -ая.

Тогда

$$U_{mj}^{(1)}=F_{U_{mj}}^{(AT)}(T_j)^{(1)},$$

где $U_{mj}^{(1)}$ – когнитивная составляющая навыков $F_{U_{mj}}^{(AT)}(T_j)^{(1)}$ j -го лётчика воспринимать ИП от имитаторов первой группы, зависящая от времени его налёта T_{mj} в m -ой ситуации.

Приобретение навыков у j -го лётчика от имитато-

ров первой группы имеет предел

$$\lim_{T_{mj} \rightarrow \infty} F_{mj}^{(1)}(T_{mj}) \rightarrow F_{\max(mj)}^{(1)},$$

где $F_{\max(mj)}^{(1)} = \text{const } I_{mj}^{(1)}$ – максимальный объём информации, который лётчик может получить от имитаторов первой группы.

Каждый k -ый имитатор второй группы синтезирует ИП

$$I_k^{(2)}(t_n)=F_k^{(2)}(t_n, x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots),$$

о работе k -ого узла ЛА по алгоритмам $F_k^{(2)}$, реализующим математические модели синтезирующие $x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots$, описывающие физические процессы взаимодействия самолётных радиотехнических средств самолётовождения (РТСс) с наземными радиотехническими средствами самолётовождения (РТСн).

$$I^{(2)} = \sum_{k=1}^{K_2} I_k^{(2)}, \quad (2)$$

позволяет j -му лётчику определить $\Theta(I_d^{(1)}(t_n))$, обрабатывая ИП, синтезированный одним имитатором РТСс и подтвердить $\Theta(I_d^{(1)}(t_n))$, обрабатывая ИП, синтезированный другим имитатором РТСс, в произвольном порядке, что формирует у j -го лётчика составляющие его когнитивной модели $C_j^{(2)}$ о навыках самолётовождения и частично решения задач пилотирования ЛА в m -ой ситуации.

$$C_{mj}^{(2)}=E_{mj}^{(2)}(T_{mj}, I_m^{(2)}, I_p^{(2)}), \quad (3)$$

где $E_{mj}^{(2)}$ – функция способностей j -го лётчика воспринимать ИП (1.10) в m -ой ситуации,

$I_m^{(2)} = \sum_{k=1}^{K_2} I_k^{(2)}$ – суммарный ИП от имитаторов второй группы в m -ой ситуации,

$I_p^{(2)}$ – карта с информацией о размещении во внешней среде моделей РТСн.

Приобретение j -м лётчиком профессиональных навыков самолётовождения и частично пилотирования ЛА $U_{jm}^{(2)}$, в m -х ситуациях зависит от умения $F_{mj}^{(2)}(T_{mj})$ j -го лётчика воспринимать ИП, синтезированный имитаторами кабинного оборудования с учётом составляющих его когнитивной модели $C_{mj}^{(2)}(T_{mj})$. При этом считая качество $Q^{(2)}$ синтезируемой информации в ИП должно быть достаточным для прогнозирования $F_{P_{mj}}^{(2)}(T_{mj})$ места нахождения информационной 3D-модели ЛА в информационной модели внешней среды с учётом (1.4) и обработки как минимум двух значений из (1.10): в предыдущий момент времени $I^{(2)}(t_{n-\Delta(2)t})$ и в текущий момент времени $I^{(2)}(t_n)$. При этом вероятность $F_{P_{mj}}^{(2)}(T_{mj})$ подтверждения j -м лётчиком нахождения 3D-модели ЛА в ожидаемом месте модели пространства

$$F_{P_{mj}}^{(2)}(T_{mj})=U_{mj}^{(2)}(Q^{(2)}(I^{(2)}(t_{n-\Delta(2)t}), I^{(2)}(t_n), I^{(2)}(t_{n+\Delta(2)t})), C_{mj}^{(2)}),$$

где $U_{mj}^{(2)}$ – функция умения j -го лётчика извлекать из ИП, синтезированных имитаторами второй группы, информацию, необходимую для приобретения навыков самолётовождения, используя (2) от имитаторов РТСс в m -ой ситуации;

$Q^{(2)}(I^{(2)}(t_{n-\Delta(2)t}), I^{(2)}(t_n), I^{(2)}(t_{n+\Delta(2)t}))$ – качество ИП (2), синтезированных имитаторами второй группы АТ.

$$U_{mj}^{(2)}=F_{U_{mj}}^{(2)}(T_{mj}),$$

где $F_{U_{m_j}}^{(2)}(T_{m_j})$ – функция умения лётчика использовать информацию из (2) от имитаторов второй группы и $I_p^{(2)}$, зависящая от время налёта T_{m_j} j -го лётчика m -ых в ситуациях.

$\lim_{T_{m_j} \rightarrow \infty} F_{m_j}^{(2)}(T_{m_j}) \rightarrow F_{\max(m_j)}^{(2)}$, объём информации $F_{\max(m_j)}^{(2)} = \text{const} 2_{m_j}$, где $F_{\max(m_j)}^{(2)}$ – максимальный объём информации, который лётчик может получить от имитаторов второй группы.

Синтезированные имитаторами первой и второй групп ИП $I_m^{(1)}$ и ИП $I_m^{(2)}$ с информацией, сформированной без участия лётчика и которую он считает всегда истинной, формируют «информационную модель полёта».

Информация, получаемая лётчиком от имитаторов, формирующих информационную модель полёта, достаточна для профессиональной подготовки лётчика пилотированию ЛА и решению задач самолётовождения при визуальной посадке на модель ВПП с формированием соответствующих составляющих $C_j^{(1)}$ и $C_j^{(2)}$, но недостаточна для решения задач самолётовождения при выполнении маршрутного полёта с ориентацией в ППМ по видимым моделям реперных объектов, синтезированных имитаторами третьей группы для формирования соответствующих составляющих $C_j^{(3)}$.

Имитаторы третьей группы синтезируют три визуально наблюдаемые модели окружающего пространства для визуального определения места нахождения модели ЛА в модели пространства $\Theta(I_d^{(1)}(t_n))$:

- имитатор визуальной обстановки (ИВО) [21] синтезирует визуально наблюдаемые 3D-модели 3D-объектов, видимых через остекление кабины с предоставлением условий подготовленному человеку профессионально обучать глазомер, наблюдая ожидаемые и узнаваемые 3D-модели реперных объектов, наблюдаемые лётчиком при реальных полётах;

- имитатор тепловизора (ИТ) синтезирует визуально наблюдаемые в ИК-диапазоне на экране ИТ 2D-проекции 3D-моделей 3D-объектов;

- имитатор радиолокатора (ИР) синтезирует визуально наблюдаемые в радиодиапазоне на экране ИР 2D-проекции 3D-моделей 3D-объектов.

Любое отличие 3D-модели от его аналога вызывает у лётчика негативный эффект. По аналогии с имитаторами первой и второй группы составляющие у j -го лётчика его когнитивной модели $C_j^{(3)}$ о навыках самолётовождения и пилотирования ЛА в m -ой ситуации для ИВО $C_{m_j}^{(3v)} = E_{v_j}^{(3v)}(T_{m_j}, I_j^{(3v)}, I_m^{(3)})$, для ИТ $C_{m_j}^{(3a)} = E_{a_j}^{(3a)}(T_{m_j}, I_j^{(3a)}, I_j^{(3pa)}, I_m^{(3)})$, для ИР $C_{m_j}^{(3o)} = E_{o_j}^{(3o)}(T_{m_j}, I_j^{(3o)}, I_j^{(3po)}, I_m^{(3)})$. По сравнению с (1) и (3) добавлены $I_j^{(3pa)}$ и $I_j^{(3po)}$, задающие режим имитаторов ИТ и ИР. В целом вся информация от имитаторов третьей группы с учетом выбора режима работы ИМ и ИР

$$I^{(3)} = I_j^{(3v)} + I_j^{(3a)} + I_j^{(3pa)} + I_j^{(3o)} + I_j^{(3po)} + I_m^{(3)}.$$

Составляющие $C_j^{(3)}$ у j -го лётчика с навыками самолётовождения и частично пилотирования ЛА формируются за счёт ИП от имитаторов третьей группы.

$C_{m_j}^{(3)} = E_{m_j}^{(3)}(T_{m_j}, I^{(3)})$, где $E_{m_j}^{(3)}$ – умение j -го лётчика воспринимать ИП, синтезируемые имитаторами третьей группы в m -ой ситуации. В отличие от имитаторов первой и второй группы ИП имитаторы третьей группы предоставляют лётчику значительно больше информации. При этом невозможно полностью приблизиться к её максимальному значению, как при полётах на АТ, так и при полётах на ЛА. При увеличении времени налёта и на АТ и на ЛА j -ый лётчик может только совершенствовать составляющие $C_j^{(3)}$: $F_{C_j}^{(3v)}, F_{C_j}^{(3a)}$ и $F_{C_j}^{(3o)}$. Эти составляющие формируются j -го лётчика при рассмотрении 3D-модели местности через ИВО $F_{C_j}^{(3v)} << F_{\max}(T_{m_j}, I^{(3v)}, I_m^{(3)})$, $F_{C_j}^{(3a)}(T_{m_j}) \rightarrow F_{\max}(I_j^{(3a)}, I_m^{(3)})$, или 2D-проекций 3D-модели местности через ИТ $F_{C_j}^{(3a)} << F_{\max}(T_{m_j}, I_j^{(3a)}, I_j^{(3pa)}, I_m^{(3)})$, $F_{C_j}^{(3a)}(T_{m_j}) \rightarrow F_{\max}(I_j^{(3a)}, I_j^{(3pa)}, I_m^{(3)})$, или через ИР $F_{C_j}^{(3o)} << F_{\max}(T_{m_j}, I_j^{(3o)}, I_j^{(3po)}, I_m^{(3)})$, $F_{C_j}^{(3o)}(T_{m_j}) \rightarrow F_{\max}(I_j^{(3o)}, I_j^{(3po)}, I_m^{(3)})$.

Опыт разработки и эксплуатации ИВО, ИТ и ИР показал, что формирование составляющих $F_{C_j}^{(3v)}, F_{C_j}^{(3a)}, F_{C_j}^{(3o)}$ при полётах на АТ зависят от качества визуально наблюдаемых изображений информационных моделей местности, что зависит от возможностей используемых КГИ и разработанной конструкторами информационной 3D-модели местности. В информационную 3D-модель местности невозможно заложить все реально существующие реперные объекты, поэтому на этапе разработки проводится анкетирование лётчиков с целью составления списка реперных объектов. Ограничения КГИ на сегодняшний день не позволяют обеспечить лётчику наблюдение всех указанных в списке моделей реперных объектов при выполнении маршрутного полёта от одного ППМ к другому с визуальным контролем всех моделей реперных объектов по маршруту полёта. Поэтому, при разработке информационной 3D-модели местности в неё включаются все информационные 3D-модели реперных объектов, которые позволяют лётчику максимально формировать составляющие $F_{C_j}^{(3v)}, F_{C_j}^{(3a)}, F_{C_j}^{(3o)}$ и обработка которых не приводит к перегрузке КГИ. Это послужило основанием отнести ИВО, ИР и ИТ к отдельной группе имитаторов АТ, которые формируют у лётчика составляющие его когнитивной модели восприятия модели визуально наблюдаемой внешней среды. В отличие от имитаторов первой и второй группы, которые формируют «информационную модель полёта» с достаточно быстро достигаемым пределом извлечения информации, необходимой для обучения пилотированию ЛА, имитаторы третьей группы, предназначенные для решения навигационных задач, с каждым полётом на АТ улучшают профессиональные навыки определения места нахождения модели ЛА в модели пространства, и эти навыки всегда совершенствуются от полёта к полёту как на АТ, так и на ЛА. Таким образом, имитаторы третьей группы максимально формируют у лётчика составляющие его когнитивной модели, отвечающие за умение решать навигационные задачи при полёте по маршруту визуально рассматривая информационные 3D-модели

реперных объектов, которые, как и при реальных полётах на ЛА необходимо ещё найти на общем фоне информационной модели местности.

На сегодняшний день задача решения навигационных задач при полёте по маршруту от одного ППИ к другому наиболее остро встала при разработке тренажёров обучения операторов БПЛА.

Заключение. В зависимости от особенностей восприятия лётчиками информации, синтезированной разными имитаторами авиационного тренажёра, их делят на три группы.

Имитаторы первой группы синтезируют для лётчика информацию от приборов кабинного оборудования для решения задач пилотирования летательного аппарата (лётчик воспринимает показания приборов, считая, что они однозначно оценивают физические процессы в соответствующих узлах ЛА).

Имитаторы второй группы синтезируют для лётчика информацию от приборов кабинного оборудования для решения задач самолётовождения «при полётах в облаках» (лётчик воспринимает показания приборов считая, что они однозначно определяют направление на выбранные наземные средства сам самолётовождения).

Имитаторы первой и второй групп синтезируют для лётчика «информационную модель полёта», достаточную для решения задач обучения пилотирования ЛА и решения навигационных задач при «полётах в облаках» и при заходе на посадку на модель ВПП. Во время полётов на АТ и ЛА лётчик приближается к пределу информации, которую он может получить от показаний приборов этих групп (составляющие когнитивной модели восприятия информации от имитаторов этой группы связаны с нахождением конкретного прибора в кабине ЛА и правил чтения соответствующей информации).

Имитаторы третьей группы синтезируют для лётчика визуальную наблюдаемую модель внешней среды. Особенностью восприятия лётчиком этой информации является необходимость постоянно совершенствовать составляющие когнитивной модели, в которых откладываются навыки визуального поиска заданного объекта. При использовании имитатора визуальной обстановки предполагается обученность зрительного аппарата конкретного лётчика умению видеть 3D-объект, в то время как он через оптику рассматривает видеоряд из 2D-проекции 3D-объекта. Во время полётов на АТ и ЛА лётчик всегда совершенствует составляющие своей когнитивной модели визуального восприятия внешнего пространства, никогда не приближаясь к максимально возможному пределу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. ГОСТ 21659-76. Тренажеры авиационные. Термины и определения. Постановлением марта 1976 г. № 716 срок действия установлен с 01.07.1977. Издательство стандартов Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 30. М. «Московский печатник», 1976. – 10 с.
2. ГОСТ Р 57259-2016. Тренажеры авиационные. Термины и определения. Дата введения 2017-06-01. Электронный текст документа подготовлен АО "Кодекс" и сверен по: официальное издание М.: Стандартинформ, 2018. <https://docs.cntd.ru/document/1200141434> (дата обращения 30.10.2021)

3. Красовский, А. А. Авиационные тренажеры / А. А. Красовский, В. И. Лопатин и др.// М.: Изд-во ВВИА им.: Жуковского, 1992.– 320 с.
4. Красовский А. А. Основы теории авиационных тренажеров //М.: Машиностроение, 1995.– 304 с.
5. Шукшунув, В. Е. Автоматизированные обучающие системы профессиональной подготовки операторов летательных аппаратов/ Под ред. В. Е. Шукшунува// М.: Машиностроение, 1986.– 240 с.
6. Лапшин, Э.В. Авиационные тренажеры модульной архитектуры. Монография/ Э.В. Лапшин [и др.]; под ред. Э.В. Лапшина, А.М. Данилова// М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию, Пенз. гос. ун-т. Пенза, 2005. – 145 с.
7. Прохоров Н.Л., Егоров Г.А. Управляющие вычислительные комплексы СМ ЭВМ/Приборы. 2006. № 3 (69). – С. 3-9.
8. Абрамов С.М., Пешин С.В., Пешин Ф.С., Першин Ю.В., Прудковский А.Г., Рыкунов А.Л., Терентьев А.Б., Тулин В.А., Володин И.А. Специализированный дискретно-аналоговый вычислитель//Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2011. № 7. – С. 608-621.
9. Мамаев В.Я. Воздушная навигация и элементы самолётовождения: Учеб. Пособие/В.Я. Мамаев, А.Н. Синяков, К.К. Петров, Д.А. Горбунов// СПбГУАП. СПб., 2002. – 256 с.
10. Вяткин С.И., Долговесов Б.С. Метод визуализации мультиобъёмных данных и функционально заданных поверхностей с применением графических процессоров//Автоматрия. 2021. Т. 57. № 2. – С. 32-40.
11. Mazurok B.S., Dolgovesov B.S., Artikov T.N., Artikov A.N., Korostelev E.I. "Integrated solution for interactive multimedia presentations" in 23rd International Conference on Computer Graphics and Vision, GraphiCon 2013 - Conference Proceedings. 23. 2020. – pp. 152-155.
12. Roganov V.R., Asmolova E.A., Serezhkin A.N., Chetvergova M.V., Andreeva N.B., Filippenko V.O. "Problem of virtual space modelling in aviation simulators" in Life Science Journal. 2014. Vol. 11, № 12 – pp. 1097.
13. Вяткин С.И., Долговесов Б.С., Мазурок Б.С., Рожков А.Ф. Эффективный метод растривания изображений для компьютерных систем визуализации реального времени//Автоматрия. 1993. № 5. – С. 45-50.
14. Роганов В.Р., Филиппенко В.О., Асмолова Е.А., Михеев М.Ю. Расширение списка задач обучения на авиационном тренажере при полётах в режиме постоянной видимости. 2016. № 24. – С. 49-55.
15. Зайцев А.В., Соловьев В.А., Кичулкин Д.А., Красавцев О.О. Сравнительная оценка способов обработки цифровых изображений, получаемых с помощью тепловизора при наблюдении беспилотных летательных аппаратов//Цифровая обработка сигналов. 2017. № 3. – С. 50-56.
16. Акиншин Р.Н., Румянцев В.Л., Петешов А.В. Результаты моделирования подавления спектра в радиолокаторе с синтезированием апертуры//Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2019. Т. 22. № 1. С. 76-82.
17. Mazurok B.S., Dolgovesov B.S., Artikov T.N., Artikov A.N., Korostelev E.I. "Integrated solution for interactive multimedia presentations" in 23rd International Conference on Computer Graphics and Vision, GraphiCon 2013 - Conference Proceedings. 23. 2020. – pp. 152-155.
18. Венников, В.А. Теория подобия и моделирования// М.1976. – 479 с
19. Новокрещенов А.С., Анищенко А.Н. Современное состояние и перспективы развития тренажерной подготовки в авиационных вузах// Журнал педагогических исследований. 2021. Т. 6. № 3. – С. 57-62.
20. Сикорский С.Т. Тактический тренажер авиационного комплекса морской авиации военно-морского флота//Программные продукты и системы. 2013. № 2. – С. 24.
21. Cížek P., Faigl J. "Self-supervised learning of the biologically-inspired obstacle avoidance of hexapod walking robot" in Bioinspiration & Biomimetics. 2019. Vol. 14. N 4. –P. 046002.

Статья поступила в редакцию 17.09.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 004.9

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0006

АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ В РЕЗУЛЬТАТАХ ПОИСКОВОЙ ВЫБОРКИ

© 2021

Шевнина Юлия Сергеевна, кандидат технических наук, доцент института

Системной и программной инженерии и информационных технологий

Томишинец Александр Михайлович, магистрант института

Системной и программной инженерии и информационных технологий

Национальный исследовательский университет МИЭТ

(124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mails: yusm@rambler.ru, miracore.cr@gmail.com)

Аннотация. Работа посвящена разработке нейросетевого алгоритма семантического анализа информации на естественном языке, который позволяет формировать список терминов и отображать их на графе связности или на семантической карте. Показана реализация алгоритма в автоматизированной информационной системе семантического анализа текста на естественном языке. Для определения веса термина в документе и связанности терминов в алгоритме семантического анализа информации используется расчетная величина индекса обратной частоты документа, учитывающая, в отличие от существующих подобных алгоритмов, влияние повторов в тексте. Это позволило точнее определять семантические особенности входной текстовой информации, учитывать связанность терминов и определять многозначные слова. Разработанный алгоритм семантического анализа информации на естественном языке и его реализация в автоматизированной информационной системе позволили значительно повысить эффективность обработки поисковой текстовой выборки по ключевым словам и представить понятную визуализацию особенностей текста в виде графа связанности терминов или семантической карты. Разработанная автоматизированная информационная система семантического анализа текста на естественном языке имеет преимущество перед аналогами, поскольку позволяет одновременно формировать список терминов с учетом их повторяемости и многозначности и визуализировать текст в виде графа связанности и семантической карты.

Ключевые слова: естественный язык, семантический анализ текста, индекс обратной частоты, *UDPipe*, поиск текста по ключевым словам, анализ информации, многозначность терминов, визуализация текста, граф связанности, семантическая карта, учет редких терминов.

AUTOMATION OF SEMANTIC ANALYSIS OF INFORMATION IN NATURAL LANGUAGE AS RESULTS OF SEARCH SAMPLING

© 2021

Shevnina Yulia Sergeevna, candidate of technical sciences, associate professor of the institute of

System and software engineering and information technologies

Tomishinets Alexander Mikhailovich, master's student of the institute of

System and software engineering and information technologies

National Research University MIET

(124498, Moscow, Zelenograd, Shokin square, building 1, e-mails: yusm@rambler.ru, miracore.cr@gmail.com)

Abstract. The work is devoted to the development of a neural network algorithm for semantic analysis of information in natural language, which allows you to form a list of terms and display them on a connectivity graph or on a semantic map. The implementation of the algorithm in an automated information system for semantic analysis of natural language text is shown. To determine the weight of a term in a document and the relatedness of terms in the algorithm for semantic information analysis, the calculated value of the index of the reciprocal frequency of the document is used, which, in contrast to existing similar algorithms, takes into account the effect of repetitions in the text. This made it possible to more accurately determine the semantic features of the input textual information, take into account the relatedness of terms and define polysemantic words. The developed algorithm for semantic analysis of information in natural language and its implementation in an automated information system made it possible to significantly increase the efficiency of processing a search text selection by keywords and to present a clear visualization of text features in the form of a graph of relatedness of terms or a semantic map. The developed automated information system for semantic analysis of text in natural language has an advantage over analogues, since it allows you to simultaneously form a list of terms, taking into account their repetition and polysemy, and to visualize the text in the form of a graph of connectivity and a semantic map.

Keywords: natural language, semantic text analysis, reverse frequency index, *UDPipe*, text search by keywords, information analysis, term ambiguity, text visualization, connectivity graph, semantic map, accounting for rare terms.

Введение. Сегодня в мире остаётся всё меньше регионов, в которых отсутствует доступ к всемирной сети Интернет. С каждым днём, благодаря огромному количеству пользователей, объём новой информации

увеличивается экспоненциально [1-5]. Однако, среди всей этой информации лишь небольшая часть оказывается полезной, выделение полезной информации из общего потока представляет сложную задачу, для

решения которой было разработано множество поисковых систем. Предварительный семантический анализ информации представляет собой первую стадию отбора информации в поисковых системах, призванный сформировать у пользователя представление об информации до непосредственного ознакомления с ней. Одним из атрибутов, формирующих данное представление, являются ключевые слова. Они позволяют сравнивать между собой некоторое количество исходной информации, определяя наиболее релевантное пользовательскому поисковому запросу [6-9].

Исходя из этого, можно выделить три задачи, которые решает предварительный анализ:

- выбор наиболее подходящего источника информации;
- формирование первоначального представления об источнике;
- сравнения различных источников информации или версий одной и той же информации.

Предварительный анализ является трудозатратным для человека и требует дополнительных знаний, поскольку семантика исходной информации не полно отражается ключевыми словами. Для решения этой актуальной проблемы предлагается использовать автоматизированный семантический анализ информации, что позволит повысить эффективность анализа результатов поисковых запросов за счет нейросетевой предварительной семантической обработки большого количества текстовой информации [10-15].

Целью работы является создание алгоритма семантического анализа информации на естественном языке в поисковой выборке и его реализация в информационной системе.

Материалы и результаты исследования. Согласно существующим алгоритмам, анализ естественного языка требует предварительных синтаксических и морфологических манипуляций над исходным текстом и проводится в несколько этапов [16, 17]:

- разделение исходного текста на предложения;
- разбиение полученных предложений на слова (токенизация);
- определение начальной формы слов (лемматизация);
- определение части речи каждого из слов (частеречный анализ).

Данные манипуляции составляют базовую часть анализа текста, на её основе происходит выстраивание более сложных конструкций. На следующем этапе происходит поиск сложных и специфичных слов или терминов [1]. Далее происходит преобразование информации на естественном языке в данные с последующей визуализацией элементов текста либо структур. Текст или структура текста представляется графом, в котором вершины – ключевые слова, словосочетания или термины, выделенные из текстов, соединенные ребрами по определенным правилам.

На сегодняшний день существуют различные программные продукты для обработки текста большого объёма и формирования единого глоссария [18], такие

программы применяются в частности для перевода текста на другой язык. Использование глоссария позволяет сохранить единство терминологии при переводе и уменьшить время выбора нужного варианта перевода [2]. Подобное программное обеспечение применяется для *SEO* анализа [3]. Наиболее известными являются программы: *Simple Concordance Program*, *MonoConc*, *MultiTerm Extract*, которые, поддерживая большое количество мировых языков, позволяют создавать списки терминов и определять для них синонимы. К популярным программам визуализации информации на основе естественного языка относятся: *Wordle*, *Taxedo*, *Many Eyes*. Эти программы дают возможность представлять исходный текст в виде облака тегов с различными настройками.

На основании проведенного аналитического обзора современных программных средств формирования списка терминов и его визуализации можно утверждать, что в настоящий момент не существует универсального программного продукта, способного осуществлять и поиск терминов и визуализацию текста. Кроме этого, облака тегов не предоставляют семантическую информацию о тексте [19]. Для решения этой проблемы требуется разработать алгоритм семантического анализа информации на естественном языке, который позволит формировать список терминов и отображать их на графе связности или на семантической карте (рис. 1).



Рисунок 1 – Алгоритм семантического анализа информации на естественном языке

Предварительная синтаксическая и морфологическая обработка текстовой информации осуществлялась с помощью библиотеки *UDPipe* [3]. Для обучения нейронной сети получены и рассчитаны индексы

обратной частоты: 129 тысяч слов после просмотра 420 тысяч страниц Википедии. Для определения веса термина в документе и связанности терминов используется расчетное значение индекса обратной частоты документа [20]

$$idf(word) = \log \left(\frac{DocCount}{DocCount_{word}} \right)$$

В процессе обучения нейронной сети была обоснована необходимость учета влияния повторов в тексте и коэффициента определения влияния повторов:

$$conc(word) = 1 + k \cdot \log \left(\frac{Count_{word}}{DocCount_{word}} \right)$$

Это позволило точнее определять семантические особенности входной текстовой информации, учитывать связанность терминов и определять многозначные слова.

Разработанный алгоритм предполагается использовать в автоматизированной информационной системе семантического анализа текста на естественном языке. К системе предъявляются следующие требования:

- 1) возможность анализа документов, содержащих текст на одном естественном языке, включающего:
 - поиск ключевых слов в тексте;
 - составление семантических карт из слов текста;
 - создание графа связности для терминов;
 - легенда встречаемости слов;
- 2) сравнение данных анализа нескольких текстов;
- 3) возможность загрузки результатов анализа текста;
- 4) ранение результатов анализа текста;
- 5) возможность экспортировать результаты анализа текста.

На основе сформулированных требований к системе построена функциональная модель информационной системы, представленная на рисунке 2. Основным актором является «Пользователь ИС», которому доступен весь функционал информационной системы.

Важной частью алгоритма семантического анализа информации на естественном языке является процедура поиска редких слов [21], который представлен в виде модели взаимодействия объектов (рис. 3). Пользователь ИС указывает текстовый файл, который обрабатывается с помощью словаря с индексами обратной частоты и данных, полученных из языковой модели настроенной на проведение токенизации, частеречного анализа. После обработки текста результирующие данные возвращаются на компоненты интерфейса и отображаются пользователю.

Для реализации требования хранения результатов анализа текста спроектирована структура базы данных. Модель базы данных представлена на рисунке 4, список таблиц базы данных представлены в таблице 1.

Для программной реализации автоматизированной информационной системы семантического анализа текста на естественном языке выбран язык программирования C++, интерфейсы реализованы с применением *Vue.js*.



Рисунок 2 – Функциональная модель автоматизированной информационной системы семантического анализа текста на естественном языке

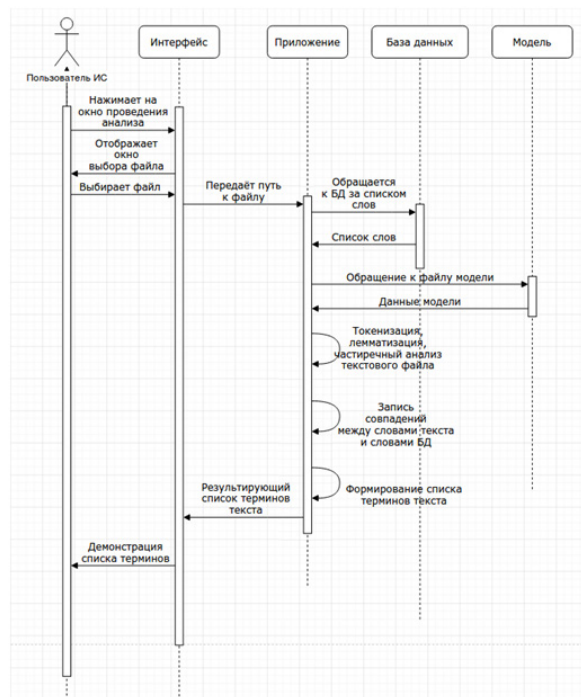


Рисунок 3 – Модель взаимодействия объектов автоматизированной информационной системы семантического анализа текста на естественном языке

Таблица 1 – Таблицы базы данных

Таблица	Описание
analyzes	Данные об анализе информации, необходимые для загрузки предыдущих анализов из архива. Данные анализа информации, получаются из обработки текста.
terms	Термины для анализа текста.
words	Слова, записанные в словаре базы данных, имеющие необходимые характеристики для воспроизведения результатов анализа текста.

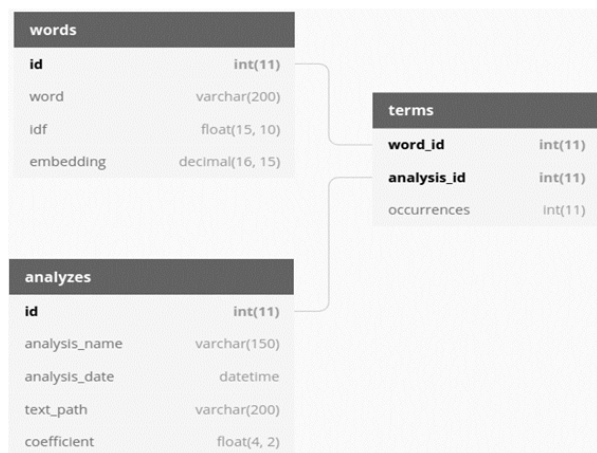


Рисунок 4 – Модель базы данных

Заключение. Разработанный алгоритм семантического анализа информации на естественном языке и его реализация в автоматизированной информационной системе позволили значительно повысить эффективность обработки поисковой текстовой выборки по ключевым словам и представить понятную визуализацию особенностей текста в виде графа связанности терминов или семантической карты. Эмпирически полученные формулы по расчету обратной частоты документа позволили точнее определять семантические особенности входной текстовой информации, учитывать связанность терминов и определять многозначные слова, что является преимуществом по сравнению с аналогичными программными решениями [20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Сравнение программ по выделению терминов // englishhelp.ru URL: <https://www.englishhelp.ru/translator/articles-for-translator/11-extract-terms-tools.html> (дата обращения: 07.06.2020)
2. Визуализации, типы, сравнения // Научно-учебная группа «Методы анализа и визуализации веб-корпусов» URL: <https://cs.hse.ru/vitext/visualize> (дата обращения: 05.06.2020)
3. Анализатор для работы с текстом // UDPipe URL: <http://ufal.mff.cuni.cz/udpipe> (дата обращения: 03.06.2020)
4. Марков А.В. Проведение сравнительного анализа двух нейронных сетей EAST и PSENET в задаче детекции текста на изображениях преискурентов // Евразийский союз ученых – М.: 2020. – С. 41-46.
5. Potaraev V. Analysis of relation types in semantic network used for text classification // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. – М.: 2020. – С. 305-308.
6. Злоказов К. Системно-функциональный семиотический подход к анализу поликодового текста: современное состояние и перспективы // Юрислингвистика. – М.: 2018. – С. 126-133.
7. Yuzhakova Yu.A., Ivanova D.S., Lavrentev V.A., Somova M.V. Addressing the issue of employing information technology in close reading // Russian linguistic Bulletin. – М.: 2020. – С. 67-70.
8. Воронин В.М., Курицин С.В., Наседкина З.А., Ицкович М.М. Использование латентного семантического анализа как альтернативы пропозиционального анализа в исследованиях понимания текста // Гуманизация образования. – М.: 2017. – С. 11-19.
9. Гусейнова К.Э. Критический дискурс-анализ как эффективный метод качественного анализа научных и образовательных текстов // Nauka.me. – М.: 2017. – С. 12.
10. Диковицкий В.В. Семантический анализ текста с применением нейросетевого анализа морфологии и синтаксиса // Труды Кольского научного центра РАН. – М.: 2017. – С. 109-115.
11. Рычагов С.А. Использование латентно-семантического анализа для автоматической классификации текстов // Международный журнал информационных технологий и

энергоэффективности. – М.: 2017. – С. 28-33.

12. Tregubov A.S., Malyugina O.V. Neural network model for finding contradictions in natural language use using tripletloss function // Components of Scientific and Technological Progress. – М.: 2020. – С. 9-14.

13. Таныгина Е.А., Власова А.О., Миронюк Т.В. Экспериментальное исследование связи естественных языков и языков программирования высокого уровня // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Лингвистика и педагогика. – М.: 2020. – С. 142-159.

14. Рожкин П.А. Разработка интеллектуальной системы глубинного машинного обучения для распознавания естественных языков // Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России. – М.: 2017. – С. 118-121.

15. Aurora S. Natural language as a technological tool // Technology and Language. – М.: 2021. – С. 86-95.

16. Вострикова Е.В., Куслий П.С. Грамматикализация категориальной ошибки и естественный язык // Вопросы философии. – М.: 2020. – С. 116-126.

17. Уткин Л.В., Мелдо А.А., Ковалев М.С., Касимов Э.М. Простой общий алгоритм объяснения диагноза на выходе интеллектуальной системы диагностики в терминах примитивов естественного языка // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – М.: 2020. – С. 242-245.

18. Polyakov O.M. Linguistic data model for natural languages and artificial intelligence. Part 4. Language // Discourse. – М.: 2020. – С. 107-114.

19. Цигульский А.М., Иванников А.В., Рогов И.С. NLP – Обработка естественных языков // StudNet. – М.: 2020. – С. 467-475.

20. Субботин А.Н. Алгоритм классификации потоков текстовой информации на естественном языке // Научно-технический вестник Поволжья. – М.: 2020. – С. 18-20.

21. Трегубов А.С. Метод обучения нейронной сети с применением функции потерь tripletloss для задачи анализа текстов естественного языка // Евразийское Научное Объединение. – М.: 2020. – С. 138-139.

Статья поступила в редакцию 12.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 519.6

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0007

**ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ И РАЗРЕШИМОСТИ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ
МОДЕЛИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
В ПРОТОЧНОМ ТРЕХМЕРНОМ ЭЛЕКТРОДЕ**

© 2021

Гвоздева Ирина Геннадьевна, старший преподаватель
кафедры «Информационно-вычислительные системы»

Кошев Александр Николаевич, доктор химических наук,
профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы»

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, e-mails: gvozd_69@mail.ru, koshev@pguas.ru)

Варенцов Валерий Константинович, доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник лаборатории гетерогенных систем

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН
(630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18, e-mail: vvk@ngs.ru)

Кузина Валентина Владимировна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-вычислительные системы»

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, e-mail: kuzina@pguas.ru)

Аннотация. Математическое моделирование позволяет изучать работу проточных трехмерных электродов в динамике, исследовать закономерности их работы в зависимости от кинетики электродных процессов, свойств системы электрод – раствор, условий электролиза, конструкции электродной системы и др. Однако для корректного проведения расчетов и правильной интерпретации результатов требуют освещения вопросы математической устойчивости и разрешимости моделирующих уравнений, поскольку исследуемая система дифференциальных уравнений не является классически устойчивой как к изменению начальных данных, так и к ошибкам правой части системы. Этот факт позволяет классифицировать такую систему как жесткую, для решения которой используется «метод стрельбы». Цель исследования – решение вопросов математической устойчивости и разрешимости дифференциальных уравнений, моделирующих распределение электрохимического процесса в проточном трехмерном электроде, используемом для очистки промышленных сточных вод от ионов тяжелых и цветных металлов. В силу сложности и многомерности математических уравнений проблемы устойчивости и разрешимости рассмотрены при естественных упрощениях и допущениях, однако не снижающих общности их применимости для сложных многомерных математических моделей, описывающих окислительно-восстановительные процессы в проточных трехмерных электродах в полной постановке. В результате исследований выявлено, что моделирующая система дифференциальных уравнений не является классически устойчивой как к изменению начальных данных, так и к ошибкам правой части системы. Используемый для ее решения метод «стрельбы» необходимо постоянно контролировать, что и выполняется нами с помощью выведенной асимптотической оценки.

Ключевые слова: математическое моделирование электрохимических процессов, проточные трехмерные электроды, углеродистые волокнистые материалы, очистка сточных вод от ионов металлов, устойчивость и разрешимость моделирующих уравнений.

**PROBLEMS OF STABILITY AND SOLVABILITY IN MATHEMATICAL MODELING
OF THE DISTRIBUTION OF AN ELECTROCHEMICAL PROCESS
IN A FLOWING THREE-DIMENSIONAL ELECTRODE**

© 2021

Gvozdeva Irina Gennadievna, senior lecturer of the department «Information and computing systems»

Koshev Alexander Nikolaevich, doctor of chemistry science,
professor of the department «Information and computing systems»

Penza State University of Architecture and Construction
(440028, Russia, Penza, German Titov St., 28, e-mails: gvozd_69@mail.ru, koshev@pguas.ru)

Varentsov Valery Konstantinovich, doctor of technical sciences, professor
Solid State Chemistry and Mechanochemistry of Siberian branch of Russian Academy of Science

(630128, Russia, Novosibirsk, st. Kutateladze, 18, e-mail: vvk@ngs.ru)

Kuzina Valentina Vladimirovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the department «Information and computing systems»

Penza State University of Architecture and Construction
(440028, Russia, Penza, German Titov St., 28, e-mail: kuzina@pguas.ru)

Abstract. Mathematical modeling makes it possible to study the operation of flowing three-dimensional electrodes

in dynamics, to investigate the patterns of their operation depending on the kinetics of electrode processes, the properties of the electrode-solution system, electrolysis conditions, the design of the electrode system, etc. However, for correct calculations and correct interpretation of the results, the issues of mathematical stability and solvability of modeling equations need to be covered, since the system of differential equations under study is not classically stable both to changes in the initial data and to errors in the right part of the system. This fact makes it possible to classify such a system as rigid, for which the "shooting method" is used. The aim of the study is to solve the problems of mathematical stability and solvability of differential equations that model the distribution of the electrochemical process in a three-dimensional flowing electrode used to purify industrial wastewater from ions of heavy and non-ferrous metals. Due to the complexity and multidimensionality of the mathematical equations, the stability and solvability problems are considered with natural simplifications and assumptions, but they do not reduce the generality of their applicability for complex multidimensional mathematical models describing redox processes in flowing three-dimensional electrodes in a complete formulation. As a result of the research, it was revealed that the modeling system of differential equations is not classically stable both to changes in the initial data and to errors in the right-hand side of the system. The "shooting" method used to solve it must be constantly monitored, which we do with the help of the derived asymptotic estimate.

Keywords: mathematical modeling of electrochemical processes, flowing three-dimensional electrodes, carbon-graphite fibrous materials, wastewater treatment from metal ions, stability and solvability of modeling equations.

Введение. В работах [1-7] приведены математические модели и методы расчетов, разработанные нами для теоретического изучения и практических вычислений характеристик электрохимических процессов в реакторах с проточными трехмерными электродами. Изучение закономерностей электродных реакций и кинетики электродных процессов в зависимости от электрохимических и технологических параметров электрохимических систем и их конструкционных особенностей методами математического моделирования позволяет рассчитывать и оптимизировать конкретные электрохимические процессы с использованием ПТЭ, определять оптимальные условия ведения процессов и элементы конструкции электролизера. Однако для корректного проведения расчетов и правильной интерпретации результатов требуют освещения вопросы математической устойчивости и разрешимости моделирующих уравнений.

Цель исследования – решение некоторых вопросов математической корректности систем дифференциальных уравнений, описывающих электрохимические процессы в ПТЭ.

В силу достаточной сложности и многомерности математических уравнений, описывающих окислительно-восстановительные процессы в проточных трехмерных электродах в общей постановке [8], и связанные с этим проблемы построения и доказательства математических положений, в данной работе авторами рассмотрены математические аспекты моделирования процессов в ПТЭ при существенных упрощениях и допущениях, которые, однако, могут иметь место в реальных электрохимических процессах в пористых средах. Естественно, приведенные положения и утверждения будут справедливы и в более общих случаях, таких как, например, многомерность модели, ее нестационарность, в случае зависимости параметров модели и электрохимических констант от изменяющихся во времени технологических и реакционных условий процесса, а также от возможных корректировок управляющих параметров (плотность тока, подаваемого на ПТЭ, скорость протока электролита, электропроводность раствора и материала элект-

рода и т.п.).

Материалы и результаты исследования. *Устойчивость системы по начальным данным.* Точность решения системы дифференциальных уравнений непосредственно зависит от ее устойчивости или неустойчивости при возможных ошибках, возможных при задании начальных данных, возникающих как при экспериментальных исследованиях, так при накоплении ошибок расчетного характера [9, 10].

Система моделирующих уравнений имеет вид [10]:

$$\frac{d^2E}{dx^2} = \frac{-\kappa_T'(x) \kappa_{ж}}{\kappa_T(x)(\kappa_T(x) + \kappa_{ж})} \frac{dE}{dx} + S_v \left(\frac{1}{\kappa_T(x)} + \frac{1}{\kappa_{ж}} \right) J_s(x); \quad (1)$$

$$J_s(x) = j_0 \frac{\exp(\alpha ZFE(x)/RT) - \exp((\alpha - 1)ZFE(x)/RT)}{1 + j_0 \exp(\alpha ZFE(x)/RT) / ZFK_m C(x)}; \quad (2)$$

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{S_v}{vZF} J_s(x); \quad (3)$$

$$\frac{dE}{dx}(0) = -\frac{J_{cp}}{\kappa_T(0)}; \quad \frac{dE}{dx}(L) = \frac{J_{cp}}{\kappa_{ж}}; \quad C(0) = C_0. \quad (4)$$

Рассмотрим устойчивость системы (1) – (4). Введем обозначения комплексов параметров, участвующих в рассматриваемой математической модели:

$$A = \frac{ZF}{RT}, \quad B = \frac{j_0}{ZFK_m}, \quad D = \frac{S_v}{vZF}, \quad G = \left(\frac{1}{\kappa_T} + \frac{1}{\kappa_{ж}} \right);$$

$$Y_1(x) = E(x) - \varphi_R + Y_1^0; \quad Y_2(x) = \frac{dE}{dx}(x) + Y_2^0;$$

$$Y_3(x) = C(x); \quad Y_1^0 = E(0); \quad Y_2^0 = \frac{dE}{dx}\Big|_{x=0}; \quad Y_3^0 = C_0. \quad (5)$$

Тогда систему (1) – (4), описывающую электрохимический процесс в проточном трехмерном электроде, можно записать в виде автономной системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{dY_1}{dx} = Y_2 - Y_2^0 = f_1(Y_1, Y_2, Y_3);$$

$$\frac{dY_2}{dx} = G \left[j_0 \frac{\exp(A\alpha(Y_1 - Y_1^0)) - \exp(A(\alpha - 1)(Y_1 - Y_1^0))}{1 + \left(\frac{B}{Y_3}\right) \exp(A\alpha(Y_1 - Y_1^0))} \right] = f_2(Y_1, Y_2, Y_3);$$

$$\frac{dY_3}{dx} = D \left[j_0 \frac{\exp(A\alpha(Y_1 - Y_1^0)) - \exp(A(\alpha - 1)(Y_1 - Y_1^0))}{1 + \left(\frac{B}{Y_3}\right) \exp(A\alpha(Y_1 - Y_1^0))} \right] = f_3(Y_1, Y_2, Y_3). \quad (6)$$

Запишем линеаризованную систему дифференциальных уравнений, соответствующую автономной системе дифференциальных уравнений (6):

$$\frac{dY_i}{dx} = \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial Y_k} (Y_k - Y_k^0), i = 1, \dots, n.$$

Характеристическим уравнением такой системы будет алгебраическая система относительно вектора λ :

$$\det \left[\frac{\partial f_i}{\partial Y_k} \Big|_{Y=Y_i^0} - \lambda \delta_k^i \right] = 0. \quad (7)$$

Решением этой системы являются числа $\lambda_1 = 0$, $\lambda_{2,3} = \pm \sqrt{\partial f_2 / \partial Y_1}$, среди которых один из корней является положительным, что свидетельствует о неустойчивости дифференциальной системы (6) по начальным данным. Следовательно, и моделирующая электрохимический процесс система (1) – (4) является неустойчивой.

Неустойчивость системы (1) – (4) представляет собой существенную проблему с точки зрения численного решения задачи. Напомним, что математическая модель изучаемого процесса электроосаждения на ПТЭ является двухточечной задачей для дифференциального уравнения второго порядка, и для ее решения используется «метод стрельбы», когда недостающее условие на неизвестную функцию в начальной точке неизвестно и подбирается путем численных экспериментов из условия совпадения начального и конечного значений производной неизвестной функции с заданными условиями. Следовательно, недостающее условие на неизвестную искомую функцию распределения потенциала процесса должно быть выбрано наиболее приближенным к истинному значению. Как это можно сделать, показано в [10].

Об устойчивости решения моделирующей дифференциальной системы по правой части. Правая часть системы (1) – (4) в общем случае представляет собой сложную нелинейную функцию, зависящую от известных и экспериментально определяемых параметров и констант, в общем случае зависящих от координаты точки в трехмерном проточном электроде. Естественно предположить, что функции, участвующие в правой части дифференциальной системы, не всегда вычисляются достаточно точно, следовательно, возможно наличие отклонений вычисляемых значений от истинных. Очевидно, вопрос влияния ошибок вычисления функции правых частей на общую точность решения задачи требует рассмотрения и анализа.

Покажем, что система (1) – (4) не является устойчивой и по правой части даже в простом случае, когда удельную электропроводность ПТЭ по толщине можно считать постоянной величиной: $\kappa_1(x) = \kappa_1$, а в электрохимической реакции участвует один компонент. При этом внесение ошибки при вычислении значения $J_S(x)$ может привести к накоплению ошибки в решении $E(x)$. Уравнение

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = S_V \left(\frac{1}{\kappa_T(x)} + \frac{1}{\kappa_{ж}} \right) \sum J_S(x) \quad (8)$$

перепишем в виде:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{dE}{dx}(0) + \int_0^x S_V \left(\frac{1}{\kappa_T(x)} + \frac{1}{\kappa_{ж}} \right) \sum J_S(x) dx.$$

Обозначим $\frac{dE}{dx}(0) + \int_0^x S_V \left(\frac{1}{\kappa_T(x)} + \frac{1}{\kappa_{ж}} \right) \sum J_S(x) dx = \Phi(x, E)$, то есть

$$\frac{dE}{dx} = \Phi(x, E). \quad (9)$$

Пусть $E(x)$ – точное решение уравнения (9), а $\tilde{E}(x)$ – решение уравнения с ошибкой $\delta\Phi$ в правой части:

$$\frac{d\tilde{E}}{dx} = \Phi(x, \tilde{E}) + \delta\Phi. \quad (10)$$

Вычтем из (10) уравнение (9), получим:

$$\frac{d(\tilde{E} - E)}{dx} = \Phi(x, \tilde{E}) - \Phi(x, E) + \delta\Phi. \quad (11)$$

Из одной из теорем математического анализа следует $\Phi(x, \tilde{E}) - \Phi(x, E) = \frac{d\Phi}{dE}(x, \bar{E}) = \Phi'_E$, где \bar{E} – некоторое промежуточное значение между E и \tilde{E} . Тогда (11) мож-

но записать в виде: $\frac{d(\tilde{E} - E)}{dx} = (\tilde{E} - E)\Phi'_E(x, \bar{E}) + \delta\Phi$

$$\text{или } \frac{d(\tilde{E} - E)}{(\tilde{E} - E)} = \Phi'_E(x, \bar{E}) dx + \frac{\delta\Phi dx}{(\tilde{E} - E)}.$$

Полагая, не ограничивая общности, что $\tilde{E} - E > 0$, проинтегрируем последнее уравнение в пределах изменения x , то есть от 0 до L , получим после несложных преобразований:

$$\tilde{E}(L) - E(L) = (\tilde{E}(0) - E(0)) \exp\left(L \Phi'_E(x, \bar{E})\right) \exp\left(\delta\Phi \int_0^L \frac{1}{\tilde{E}(x) - E(x)} dx\right). \quad (12)$$

Предположим, что $\tilde{E} - E$ – ограниченная величина, не зависящая от значений L и $\delta\Phi$, то есть $\tilde{E}(x) - E(x) \leq M$. Тогда получаем неравенство:

$$\tilde{E}(x) - E(x) \geq M \exp\left(L \times \Phi'_E(x, \bar{E})\right) \exp\left(\delta\Phi \frac{L}{M}\right),$$

которое показывает, что $\tilde{E} - E$ растет экспоненциально с ростом как L , так и $\delta\Phi$. Получили противоречие, которое говорит о том, что величина $\tilde{E} - E$ может неограниченно возрастать с ростом L и $\delta\Phi$.

Очевидно, что с ростом числа компонентов электроактивных частиц, участвующих в электродной реакции, пропорционально возрастет и количество уравнений дифференциальной системы (1) – (4) и, следовательно, увеличится вероятность возникновения ошибок в правой части системы. Это означает, что при создании практически реализуемой математической модели электрохимического процесса в проточном трехмерном электроде необходимо очень тщательно подходить к вычислению и формированию всех электрохимических параметров и функций, участвующих в математической модели.

Асимптотическая оценка решения.

$$K_1 = \frac{\kappa_T + \kappa_{ж}}{\kappa_{ж} \kappa_T} S_V j_0;$$

Введем обозначения:

$$K_2 = \frac{\alpha ZF}{RT}; \quad K_3 = \frac{(1-\alpha)ZF}{RT}; \quad K_4 = j_0;$$

$$K_5 = ZFK_m; \quad K_6 = \frac{\kappa_T \kappa_{ж} K_m}{(\kappa_T + \kappa_{ж})^v}; \quad K_7 = \frac{S_V j_0}{vZF};$$

$$K_8 = j_0 - \frac{I_{кж} K_m}{(\kappa_T + \kappa_{ж})^v} + C_0 ZFK_m; \quad E_1 = -\frac{I}{\kappa_T}.$$

Уравнения (1) – (3) моделирующей системы (1) – (4), запишутся следующим образом:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = K_1 \left(\frac{\exp(K_2 E) - \exp(-K_3)}{1 + K_4 \exp(K_2 E) / K_5 C(x)} \right);$$

$$\frac{dC}{dx} = K_7 \left(\frac{\exp(K_2 E) - \exp(K_3 E)}{1 + \exp(K_2 E) / (K_5 C(x))} \right).$$

Предположим, что $C=C_0 \sim const$, что реализуется, когда степень извлечения металла невысока, получим:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = K_1 \left(\frac{\exp(K_2 E) - \exp(-K_3 E)}{1 + K_6 \exp(K_2 E)} \right), K_6 = \frac{K_4}{C_0 K_5} > 0. \quad (13)$$

Упростим уравнение (13), записывая его правую часть в виде некоторого приближения. Для этого воспользуемся разложением в ряды Тейлора экспонент в правой части:

$$\exp(K_2 E) = 1 + K_2 E + \frac{(K_2 E)^2}{2!} + \frac{(K_2 E)^3}{3!} + \dots;$$

$$\exp(-K_3 E) = 1 - K_3 E + \frac{(K_3 E)^2}{2!} - \frac{(K_3 E)^3}{3!} + \dots$$

Рассмотрим соотношения:

$$\begin{aligned} \exp(K_2 E) - \exp(-K_3 E) &= \\ &= (K_2 + K_3)E + \frac{K_2^2 - K_3^2}{2!} E^2 + \frac{K_2^3 + K_3^3}{3!} E^3 + \dots \\ 1 + K_6 \exp(K_2 E) &= \\ &= 1 + K_6 \left(1 + K_2 E + \frac{(K_2 E)^2}{2!} + \frac{(K_2 E)^3}{3!} + \dots \right) = \\ &= (1 + K_6) + K_2 K_6 E + \frac{K_2^2 K_6 E^2}{2!} + \frac{K_2^3 K_6 E^3}{3!} + \dots \end{aligned}$$

Тогда частное $\frac{\exp(K_2 E) - \exp(-K_3 E)}{1 + K_6 \exp(K_2 E)}$ в правой части уравнения (13) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\exp(K_2 E) - \exp(-K_3 E)}{1 + K_6 \exp(K_2 E)} &= \\ &= \frac{(K_2 + K_3)E + \frac{K_2^2 - K_3^2}{2!} E^2 + \frac{K_2^3 + K_3^3}{3!} E^3 + \dots}{(1 + K_6) + K_2 K_6 E + \frac{K_2^2 K_6 E^2}{2!} + \frac{K_2^3 K_6 E^3}{3!} + \dots} \end{aligned}$$

Обозначим:

$$A = K_2 + K_3, \quad B = \frac{K_2^2 - K_3^2}{2!} E^2 + \frac{K_2^3 + K_3^3}{3!} E^3 + \dots,$$

$$C = 1 + K_6, \quad D = K_2 K_6, \quad W = \frac{K_2^2 K_6 E^2}{2!} + \frac{K_2^3 K_6 E^3}{3!} + \dots$$

$$\begin{aligned} \frac{\exp(K_2 E) - \exp(-K_3 E)}{1 + K_6 \exp(K_2 E)} &= \frac{AE + B}{C + DE + W} = \\ &= \frac{A}{C} E + \left(\frac{AE + B}{DE + C + E} - \frac{AE}{C} \right) = \\ &= \frac{A}{C} E + \frac{ACE + BC - ADE^2 - ACE - AWE}{C(DE + C + W)} = \frac{A}{C} E + F. \end{aligned}$$

Здесь $F = \frac{BC - ADE^2 - AWE}{C(DE + C + W)}$, причем числитель в F содержит E во второй и в более высоких степенях.

Таким образом, уравнение первого приближения

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = K_1 \frac{A}{C} E$$

для (13) имеет вид: $\frac{d^2 E}{dx^2} = K_1 \frac{K_2 + K_3}{1 + K_6} E.$ (14)

Заметим, что характеристическое уравнение для (14) $\lambda^2 - K_1 \frac{K_2 + K_3}{1 + K_6} = 0$ имеет два корня: положительный и отрицательный, что свидетельствует о неустойчивости уравнения первого приближения. Если $K_1 = K_1(x)$, то уравнение первого приближения имеет вид:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} - q(x)E = 0, x \geq x_0 \geq 0, \quad (15)$$

$$\text{где } q(x) \equiv K_1(x) \frac{K_2 + K_3}{1 + K_6} > 0, x \geq 0.$$

Уравнение (15) можно привести к системе двух линейных дифференциальных уравнений первого порядка вида:

$$\begin{cases} E' = P_{11}(x)E + P_{12}(x)Z; \\ Z' = P_{21}(x)E + P_{22}(x)Z, \end{cases} \quad (16)$$

для чего необходимо выбрать P_{ij} так, чтобы выполнялись условия:

$$P_{11} + P_{22} + \frac{P'_{12}}{P_{12}} = 0, \quad p_{12}P_{21} + P'_{11} + P_{11}^2 - q(x) = 0. \quad (17)$$

Подберем $P_{ij}(x)$ так, чтобы с помощью неравенства Важевского [10]:

$$\|X(x)\| \leq \|X(x_0)\| \exp\left(\int_{x_0}^x \Lambda(t) dt\right), \quad (18)$$

$$X = \text{col}(E, Z),$$

$$\Lambda = 0,5 \left[P_{11} + P_{22} + \sqrt{(P_{11} - P_{22})^2 + (P_{12} + P_{21})} \right] \quad (19)$$

можно было бы получить оценку нормы решения системы (16) и, следовательно, уравнения (15).

Положим $P_{11} = \sqrt{q}$, $P_{12} = \sqrt{q}$. Тогда система (17) принимает вид:

$$\begin{cases} \sqrt{q} + P_{22} + \frac{q'}{2q} = 0, \\ \sqrt{q}P_{21} + \frac{q'}{2\sqrt{q}} = 0. \end{cases}$$

Решая эту систему относительно P_{22} и P_{21} , находим: $P_{22} = -\sqrt{q} - \frac{q'}{2q}$, $P_{21} = -\frac{q'}{2q}$.

Исследуемая система примет вид:

$$\begin{cases} E' = \sqrt{q}E + \sqrt{q}Z, \\ Z' = -\frac{q'}{2q}E + \left(-\sqrt{q} - \frac{q'}{2q}\right)Z. \end{cases}$$

При этом $\Lambda = 0,5 \left[-\frac{q'}{2q} + \sqrt{5q + \frac{q'}{\sqrt{q}} + 0,5\left(\frac{q'}{q}\right)^2} \right]$. И, следовательно, оценку (18) можно записать в виде в виде:

$$\|X\| \leq \|X(x_0)\| \sqrt{\frac{q(x_0)}{q(x)}} \exp \left[0,5 \int_{x_0}^x \sqrt{5q + \frac{q'}{\sqrt{q}} + 0,5\left(\frac{q'}{q}\right)^2} dt \right].$$

Заключение. Таким образом, исследуемая система дифференциальных уравнений не является классически устойчивой как к изменению начальных данных, так и к ошибкам правой части системы. Этот факт позволяет классифицировать такую систему как жесткую [11-13]. Как уже отмечалось, ошибки в значениях начальных данных могут возникнуть из-за возможных погрешностей при определении электрохимических констант, участвующих в формировании начальных данных, а ошибки в правой части системы,

кроме того, могут произойти из-за погрешностей вычислений, обусловленных её сильной нелинейностью.

Краевая задача для системы (1 – 4) является двухточечной, а не классической задачей Коши и, следовательно, для её решения необходимо применять метод «стрельбы», когда для неизвестных функций краевые условия задаются в начале интервала изменения переменной, задача решается, как задача Коши, затем начальные значения для функций, для которых краевые условия заданы в конце интервала интегрирования, корректируются, и система решается заново и т.д. Очевидно, что для систем, неустойчивых по начальным данным, метод «стрельбы» необходимо постоянно контролировать, что и делается нами с помощью выведенной асимптотической оценки.

Для решения жестких систем рекомендуется применять неявные методы Рунге – Кутты [14-16], полуявные методы Розенброка [17, 18], а также хорошо зарекомендовавшие себя жестко устойчивые методы с переменным шагом, так называемые «формулы дифференцирования назад», где производная в текущей точке аппроксимируется по нескольким предыдущим значениям [12]. Такие методы предложены и проанализированы, например, в работах [12, 19] и программно реализованы в работе [20]. Одну из программных разработок мы использовали при проведении численных расчетов там, где это необходимо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Углеродные волокнистые электроды: свойства, модификация, процессы и электролизеры. Математическое моделирование и оптимизация: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2021. – 176 с.
2. Окислительно-восстановительные процессы на проточных трехмерных электродах. Математическое моделирование. Теория. Эксперимент: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2020. – 172 с.
3. Варенцов, В.К. Современные проблемы электролиза и задачи оптимизации процессов в реакторах с трехмерными углеродными электродами: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 286 с.
4. Теоретические основы и моделирование электрохимических процессов в системах с проточными трехмерными электродами: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, И.Ф. Сухов, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 128 с.
5. Кошев, А.Н. Разработка и исследование математических моделей нестационарных процессов в электрохимических реакторах с проточными трехмерными электродами: моногр. / А.Н. Кошев, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 119 с.
6. Гвоздева, И.Г. Управление электрохимическим реактором с проточными трехмерными электродами за счет оптимального распределения электропроводности системы / И.Г. Гвоздева, А.Н. Кошев, В.К. Варенцов // Управление большими системами, 2010, № 29. – С. 184-200.
7. Варенцов В.К. Моделирование процесса газообразования водорода в проточных трехмерных электродах при извлечении металлов из растворов электролитов / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство, 2017, № 3 (32). – С. 128-135.
8. Процессы в пористом электроде в случае распределенной скорости протока электролита / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, И.Ф. Сухов, И.Г. Гвоздева // Математическое моделирование, 2013, Т. 25, № 2. – С. 97-110.
9. Кошев А.Н. Математическое моделирование процесса электроосаждения металлов из многокомпонентных систем на проточные объемно-пористые электроды / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, В.Г. Камбург // Известия СО АН СССР. Сер. хим. наук. – 1984. – Вып. 6. – С. 24-27.
10. Кошев А.Н. Краевые условия для дифференциальных уравнений, описывающих электрохимические процессы в реакторах с проточными трехмерными электродами / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов // Математическое моделирование, 2014, Т. 26, № 2. – С. 11-23.
11. Демидович Б.П. Лекции по математической теории устойчивости. / Б.П. Демидович. – М.: Наука, 1967. – 472 с.
12. Хайрер Э. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. / Э. Хайрер, Г. Ваннер. – М.: Мир, 1999. – 685 с.
13. Скворцов Л.М. Простые явные методы численного решения жестких обыкновенных дифференциальных уравнений / Л.М. Скворцов // Вычислительные методы и программирование, 2008, Т. 9, № 6. – С. 154-162.
14. Скворцов Л.М. Диагонально-неявные методы Рунге – Кутты для жестких задач / Л.М. Скворцов // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 46:12 (2006). – 2209-2222; Comput. Math. Math. Phys., 46:12 (2006), 2110-2123.
15. Скворцов Л.М. Явные адаптивные методы Рунге – Кутты / Л.М. Скворцов // Матем. моделирование, 2011, Т. 23, № 7. – С. 73-87.
16. Зубанов А.М. Численное исследование одношаговых явно-неявных методов, L-эквивалентных жестко точным двухстадийным схемам Рунге – Кутты / А.М. Зубанов, П.Д. Широков. // Матем. Моделирование, 2012, Т. 24, № 12. – С. 129-136.
17. Rosenbrock H.H. Some general implicit processes for the numerical solution of differential equations / H.H. Rosenbrock // Computer, 1963, N 5. – P. 329-330.
18. Альшин А.Б. Об одной новой двухстадийной схеме Розенброка для дифференциально-алгебраических задач / А.Б. Альшин, Е.А. Альшина // Матем. моделирование, 2011, Т. 23, № 3. – С. 139-160.
19. Годунов С.К. Разностные схемы (введение в теорию) / Годунов С.К., Рябенский В.С. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
20. Hindmarch A.C. Gear: Ordinary differential equation system solver, Lawrence Livermore Laboratory, University of California, Livermore, 1974. – Rev. 3, UCSD-30001.

Статья поступила в редакцию 05.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 004.272.2

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0008

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЕРИФИКАЦИИ БЛОЧНО-СИНХРОННЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, ПОСТРОЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ *BIGDATA*

© 2021

Синев Михаил Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника»
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: mix.sinev@gmail.com)

Трокоз Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, проректор по научной работе

Мартышкин Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Программирование»

Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11,
e-mails: dmitriy.trokoz@gmail.com, alexey314@yandex.ru)

Аннотация. В статье приведено описание теоретических аспектов верификации блочно-синхронных параллельных программ для вычислительных систем, построенных с использованием технологии *BigData*. Мы являемся свидетелями того, как стремительно растет интерес к проблеме верификации программного обеспечения. Сейчас разработчикам программного обеспечения доступен широкий спектр методов доказательства программных свойств на популярных языках программирования, и средств, позволяющих автоматизировать проверку корректности приведенных доказательств. Процесс верификации программ является сложным и дорогим с финансовой точки зрения. Несмотря на это, есть ряд преимуществ, которые делают верификацию незаменимой в некоторых случаях, даже в сравнении с традиционным тестированием. В постановочной части исследования определен объект исследования – семантика языков программирования и инструментария для создания блочно-синхронных параллельных программ, а также поставлена цель исследования – описание абстрактного вычислителя, выполняющего программы на специальном языке, являющимся подмножеством языка C, который можно использовать для верификации программ. В ходе проведенных по тематике статьи исследований получены важные результаты, среди которых аналитический обзор по проблеме актуальности верификации параллельных программ. Обоснован выбор модели построения блочно-синхронных параллельных программ для создания производительного программного обеспечения. Выявлены случаи, когда формальная верификация программного обеспечения целесообразнее тестирования. Проанализированы актуальные публикации западных авторов, занимающихся исследованиями по проблемам верификации блочно-синхронных параллельных программ. Показано краткое описание семантики языка *BSPC*. В заключении сформулированы основные выводы по проделанной работе.

Ключевые слова: большие данные, верификация, модель, параллельная программа, параллельная система, проверка, распределенная система, семантика, тестирование, язык программирования.

THEORETICAL ASPECTS OF VERIFICATION OF BLOCK-SYNCHRONOUS PARALLEL PROGRAMS FOR COMPUTING SYSTEMS BUILT USING *BIGDATA* TECHNOLOGY

© 2021

Sinev Mihail Petrovich, candidate of technical sciences,
associate professor of sub-department «Computer engineering»

Penza State University
(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: mix.sinev@gmail.com)

Trokoz Dmitriy Anatolevich, candidate of technical sciences, docent, vice-rector for scientific work

Martyshkin Alexey Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, head of sub-department «Programming»
Penza state technological University

(440039, Russia, Penza, BaydukovProyezd / Gagarin Street, 1a/11,
e-mails: dmitriy.trokoz@gmail.com, alexey314@yandex.ru)

Abstract. The article describes the theoretical aspects of verification of block-synchronous parallel programs for computing systems built using *BigData* technology. We are witnessing a rapidly growing interest in the problem of software verification. Now software developers have access to a wide range of methods for proving program properties in popular programming languages, and tools that allow automating the verification of the correctness of the proofs given. The software verification process is complicated and expensive from a financial point of view. Despite this, there are a number of advantages that make verification indispensable in some cases, even in comparison with traditional testing. In the staged part of the study, the object of research is defined - the semantics of programming languages and tools for creating block-synchronous parallel programs, and the purpose of the study is to describe an abstract computer that executes programs in a special language, which is a subset of the C language that can be used for program verification. In the course of the research conducted on the subject of the article, important results were obtained, including an

analytical review on the problem of the relevance of verification of parallel programs. The choice of a model for building block-synchronous parallel programs for creating productive software is justified. Cases have been identified when formal software verification is more appropriate than testing. The current publications of Western authors engaged in research on the problems of verification of block-synchronous parallel programs are analyzed. A brief description of the semantics of the *BSPC* language is shown. In conclusion, the main conclusions on the work done are formulated.

Keywords: big data, verification, model, parallel program, parallel system, verification, distributed system, semantics, testing, programming language.

Введение. В настоящее время наблюдается стремительно возрастающий интерес к проблеме верификации программного обеспечения. В распоряжении разработчиков имеется богатый инструментарий методов доказательства программных свойств на популярных языках программирования, а также средств, позволяющих автоматически проверять корректность доказательств [1-3]. Как правило, верификация программ – сложный и дорогой процесс. Несмотря на это, есть некоторые преимущества, делающие ее незаменимой в ряде случаев в сравнении с традиционным тестированием:

1. Гарантии поведения, предоставляемые формально верифицированным программным обеспечением, обычно более обоснованы, чем полученные обычным тестированием. В случае управляющих систем экономически выгоднее верифицировать программу, снизив риск необратимой поломки дорогого устройства вследствие некорректного поведения программы.

2. В случае, когда необходимо доказать определенные свойства преобразований или их композиций, описывающихся логикой второго порядка и выше, тестирование неэффективно. Такие задачи возникают, например, при построении систем операционных преобразований, используемых в продуктах, как *Google Docs* [4].

3. Многопоточные программы практически невозможно протестировать. Это связано с тем, что порядок выполнения отдельных инструкций каждый раз отличается

Объект исследования – семантика языков программирования и инструментария для создания блочно-синхронных параллельных программ [5].

Основная цель исследования – описание абстрактного вычислителя, выполняющего программы на специальном языке, являющимся подмножеством языка *C*, который можно использовать для верификации программ. Кроме того, он включает в себя конструкции для написания блочно-синхронных параллельных программ, семантика которых также формально описана. Для достижения поставленной цели в статье решаются задачи: изучение стандарта языка *C*; проведение анализа существующих описаний семантики языка *C*; изучение описаний модели блочно-синхронного параллелизма и ее реализаций.

Материалы и результаты исследования. Сегодня процессоры подошли к теоретическому максимуму производительности последовательных вычислений, обусловленному физическими ограничениями, которые накладываются на схемотехническую базу ЭВМ. По этой причине производители процессоров стремятся дать программистам больше возможностей

для горизонтального масштабирования программных продуктов, предоставляя им дополнительные ядра и процессоры. Существующие программные и аппаратные решения в последнее время обладают высокой популярностью, что дает основания считать, что востребованность блочно-синхронного параллелизма будет расти, ввиду ее продвижения крупными компаниями, например, *Google*, *Microsoft* и т.п.

Впервые концепция блочно-синхронного параллелизма предложена в [6]. Позже в [7] описана спецификация библиотеки *BSPLib*, которую предлагалось использовать как набор примитивов для блочно-синхронных параллельных программ. Формальное описание частей *BSPLib* описано в [8], где показана семантика реализации библиотеки совместно с минималистичным языком программирования.

Долгое время производительность компьютеров росла, подчиняясь закону Мура, который в современном толковании звучит так: каждые 24 месяца количество транзисторов в интегральной схеме удваивается. Вместе с этим увеличивалось и быстродействие схем, в том числе и благодаря увеличению частоты, на которой они работают. Это позволяло увеличивать производительность программ, написанных в фон Неймановской парадигме (общая память, процессор, последовательное выполнение команд), не переписывая их, а лишь перенося их на более быстродействующие компьютеры. Сегодня наступил тот момент, когда процесс увеличения быстродействия последовательных вычислений существенно тормозит то, что компьютеры в своей миниатюризации дошли до состояния, когда уменьшение транзисторов произвести все труднее из-за разнообразных физических ограничений [9]. Возможности по дальнейшей миниатюризации полностью не исчерпаны [10]. Однако повысить производительность компьютера потенциально можно и на имеющейся схемотехнической базе – добавив дополнительные ядра в процессоры.

Многие существующие программы не адаптированы для выполнения в многопроцессорной среде. Они никак не могут задействовать дополнительные ресурсы в силу своей последовательностной природы. Писать параллельные программы сложнее, поскольку параллельные процессы обычно имеют общие ресурсы и могут конкурировать за них. В этой ситуации программисты обычно прибегают или к различным примитивам синхронизации (которые, в конечном счете, тормозят работу программы и могут служить причинами различных блоков – *spinlock*, *deadlock* и т.д.), или пользуются *lock-free* алгоритмами и структурами данных, которые крайне сложны в создании и требуют специальных навыков и высокой квалификации.

Вопрос разработчиков программного обеспечения «Как сделать параллельное программирование проще?» волнует по сей день. Универсального и оптимального с точки зрения производительности решения, конечно, нет. Различные исследователи вносят свои предложения моделей вычислений, которые достаточно производительны в большинстве случаев и существенно облегчают процесс написания параллельных программ, делая их поведение более предсказуемым. Создание такой модели должно стимулировать развитие параллельных вычислений. Одной из таких моделей является модель блочно-синхронного параллелизма. Она призвана играть ту же роль для параллельных вычислений, что и фон Неймановская модель для последовательных – быть универсальной абстракцией, точкой зрения, с которой удобно рассматривать построение алгоритмов. Эта модель может быть реализована программно или аппаратно.

Модель блочно-синхронного параллелизма. Модель блочно-синхронного параллелизма предлагает модель вычислений для параллельного программирования, которая должна обладать свойствами: быть независимой от аппаратной платформы; обеспечивать предсказуемое быстродействие; улучшать предсказуемость поведения программы и простоту написания; предоставлять максимально простую модель оценки сложности выполнения программы; быть легко масштабируемой. То, что модель блочно-синхронного параллелизма удовлетворяет этим требованиям, показано исследователями в работах еще в 90-х годах [11]. Их предсказания подтвердились в 2000-е годы со взрывным ростом популярности технологий, основанных на этой модели, например, *Apache Spark* и используемого в таких компаниях, как *Alibaba* и др [12].

Структурно абстрактный вычислитель для модели блочно-синхронного параллелизма (рис. 1) состоит из:

1. Набора процессоров – компонентов, способных на вычисления и локальные транзакции с памятью. Каждый процессор обладает доступом к памяти, изолированной от других процессоров;
2. Межпроцессорной сети, которая позволяет осуществлять обмен данными между областями памяти, принадлежащими разным процессорам;
3. Набора средств для обеспечения синхронизации всей системы.

При описании блочно-синхронной модели вычислений обычно используется термин «процессор». При программной реализации неважно, как будут реализованы эти процессоры: с помощью потоков (нитей) или изолированных процессов.

Модель разделяет вычисления на супершаги, каждый из которых делится на три составляющих:

1. Многочисленные процессы производят вычисления независимо друг от друга
2. Процессы обмениваются данными, необходимыми для продолжения вычислений
3. Происходит барьерная синхронизация процессоров.

Итак, модель блочно-синхронного параллелизма разделяет две важные стадии параллельных вычис-

лений: вычисления и синхронизацию. Этот подход применим к различным параллельным архитектурам, включая архитектуры с распределенной памятью и мультипроцессорные архитектуры с общей памятью.

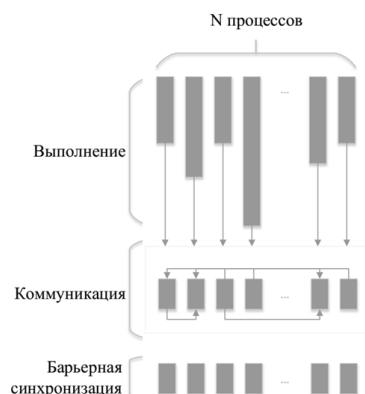


Рисунок 1 – Модель блочно-синхронного параллелизма

Модель блочно-синхронного параллелизма также предоставляет достаточно простой подход к оценке алгоритмической сложности. Стоимость выполнения программы складывается из суммы стоимостей супершагов. Стоимость одного супершага для p процессоров можно оценить выражением:

$$\max_{i=1,\dots,p} w_i + \max_{i=1,\dots,p} (h_i g) + l, \quad (1)$$

Здесь w_i обозначает стоимость локальных вычислений в процессе i , h_i – суммарное количество сообщений, которые послал и принял процесс i . Параметр g вводится для оценки производительности сети обмена сообщениями так, что для сообщения единичной длины время доставки выражается как hg . Обозначив соответствующие максимумы прописными буквами и просуммировав по количеству супершагов S получим выражение для оценки стоимости алгоритма:

$$W = Hg + Sl = \sum_{s=1}^S w_s + \sum_{s=1}^S h_s + Sl, \quad (2)$$

Среди альтернативных решений, нацеленных на те же проблемы, что и модель блочно-синхронного параллелизма, можно выделить спецификацию *MPI*, описанную в [13] и в [14-16]. И блочно-синхронная модель, и *MPI* являются описаниями среды для создания масштабируемых и переносимых параллельных программ. Главным их отличием является отсутствие концепции супершагов в *MPI*. Для программирования в модели блочно-синхронного параллелизма часто используется один из вариантов реализации спецификации *BSPlib* [6]. Существуют различные реализации этой спецификации, наиболее полный обзор приведен в [17]; в числе прочих упомянута реализация *BSP on MPI*, создающая набор примитивов для написания реализации *MPI*. Благодаря тому, что реализации *MPI* существуют практически под все распространенные платформы, адаптация соответствующей реализации *BSPlib* не представляет трудности. Библиотека *BSPlib* реализует метод *SPMD*, являющийся подкатегорией класса *MIMD* классификации вычислительных систем по Флинну. Она поддерживает два способа обмена данными между процессами: *DRMA* (прямой до-

ступ к удаленной памяти) и *BSMP* (блочнo-синхронная передача сообщений).

Поскольку одной из целей создания *BSPLib* была простота написания параллельных программ, библиотека предоставляет программисту очень небольшой набор универсальных примитивов, а именно функций, среди которых, например:

- *void bsp_begin(int maxprocs)*. Старт параллельных вычислений;
- *void bsp_end(void)*. Завершение параллельных вычислений;
- *int bsp_abort(const char* format, ...)*. Аварийное завершение всех процессов;
- *int bsp_nprocs(void)*. Возвращает число процессов;
- *int bsp_pid(void)*. Возвращает идентификатор процесса.

При запуске программа начинает свою работу в однопоточном режиме. С помощью *bsp_init* можно указать функцию, которая содержит логику работы многопоточной части программы. Эта функция должна начинаться вызовом *bsp_begin* и заканчиваться вызовом *bsp_end*.

Функция *bsp_begin* отмечает начало многопоточной части и в качестве аргумента принимает количество процессов, которые необходимо создать. После этого код внутри библиотеки создает необходимое количество копий исходного процесса, которые продолжают свою работу независимо. Каждая из них обладает своей областью памяти.

Супершаг для процесса завершается вызовом функции *bsp_sync*. Гарантировано, что все действия, запланированные на супершаге, будут совершены после вызова *bsp_sync*.

С помощью функции *bsp_push_reg* область памяти помечается как доступная другим процессам для записи. Это запланированное действие, которое совершается в конце супершага. Функция *bsp_pop_reg* отменяет этот эффект; ее действие также отложено до конца супершага.

Если каждый процесс p_i на протяжении шага выполнил функцию *bsp_push_reg* с аргументами (x_p, s_p) , то на следующем супершаге:

1. В i -ом процессе область памяти (x_p, s_p) будет считаться доступной другим процессам для чтения и записи;
2. Эти области будут логически связаны, и для любого процесса p функции *bsp_get* и *bsp_put* могут использовать соответствующий адрес x для того, чтобы обратиться к памяти процесса k , а именно к ее области (x_k, s_k) .

Функция *bsp_get* позволяет запросить данные у удаленного процесса. Операция копирования будет произведена скрытым для программиста образом в конце супершага, соответственно, будет получено то состояние, в котором находились ячейки памяти на момент завершения супершага.

Функция *bsp_put* позволяет отправить данные удаленному процессу. Операция копирования будет произведена скрытым для программиста образом в конце

супершага, но благодаря буферизации будет использоваться то состояние, в котором находились ячейки памяти на момент вызова функции *bsp_put*.

Функции *bsp_hpput* и *bsp_hpget* являются более высокопроизводительными версиями *bsp_put* и *bsp_get* соответственно. Это достигается за счет отсутствия буферизации. Иными словами, эффект *bsp_hpput* или *bsp_hpget* может произойти в любой момент до завершения супершага, а значит для обеспечения корректности нужно гарантировать выполнение следующих инвариантов:

1. При вызове *bsp_hpput(i, x, ...)* в некотором процессе код в i -ом процессе не должен быть зависим от содержимого региона памяти по адресу x . Обычная версия *bsp_put* гарантирует отсутствие изменений x вплоть до синхронизации.

2. При вызове *bsp_hpput(i, x, ...)* в некотором процессе нельзя допускать изменения памяти в области по адресу x вплоть до синхронизации. Обычная версия *bsp_put* сразу копирует содержимое этой памяти во внутренний буфер библиотеки, так что содержимое x после этого можно произвольным образом менять.

3. При вызове *bsp_hpget(i, x, ...)* в некотором процессе нельзя допускать зависимость от содержимого региона памяти по адресу x . Обычная версия *bsp_put* гарантирует отсутствие изменений x вплоть до синхронизации.

Современные методы описания семантики. В настоящее время наибольшее распространение получили три способа описания семантики формального языка [18, 19]:

1. Операционная, где каждому структурному элементу языка ставится в соответствии функция, преобразующая состояние абстрактного вычислителя;

2. Денотационная, где программа моделируется как функция на определенных математических объектах;

3. Аксиоматическая, где конструкциям языка ставятся в соответствие правила вывода, использующиеся для вывода формул, описывающих результаты выполнения этой конструкции. Прежде всего в настоящее время это логика Хоара и основанная на ней логика разделения, удобная для доказательств утверждений про состояние кучи: отсутствие утечек памяти, двойного освобождения памяти и т.д.

Операционную семантику описывают одним из двух способов:

1. Семантика большого шага описывает конечный результат работы абстрактного вычислителя после выполнения предложения языка. Результатом интерпретации программы на основании описания семантики большого шага является конечное состояние абстрактного вычислителя.

2. Семантика малого шага описывает процесс упрощения выражения на указанном языке. Результатом интерпретации программы на основании описания семантики малого шага является последовательность шагов абстрактного вычислителя с информацией о них (трассировка).

Описание, предложенное нами, предназначается

для формализации в среде *Coq*, реализующей вариант конструктивной логики. В силу того, что описывается семантика потенциально не завершающихся программ, мы прибегнем к описанию семантики малого шага.

Средство интерактивного доказательства теорем *Coq*. Описание, предложенное нами, предназначается для формализации в среде *Coq*, реализующей вариант конструктивной логики. В силу того, что описывается семантика потенциально не завершающихся программ, мы прибегнем к описанию семантики малого шага.

Coq – средство интерактивных доказательств, основанное на разновидности теории типов Мартина-Лефа. Он следует парадигме «высказывания – типы, доказательство – термы», известной как изоморфизм Карри-Говарда. Кроме того, эта система обогащена т.н. индуктивными определениями предикатов и типов данных.

Приведем пример описания синтаксиса и семантики языка арифметических выражений с помощью индуктивных определений в *Coq*:

```
Inductive expr: =
| Add: expr-> expr-> expr
| Mul: expr-> expr-> expr
| Lit: nat->expr.
Inductive bs interpret (e:expr) (n:nat) :=
| IAdd: forall x y ix iy,
  e = Add x y ->
  bs interpret x ix ->
  bs interpret y iy ->
  n = ix + iy ->
  bs interpret e n
| IMul: forall x y ix iy,
  e = Mul x y ->
  bs interpret x ix ->
  bs interpret y iy ->
  n = ix * iy ->
  bs interpret e n
| ILit: forall x,
  e = Lit x -> n = x ->
  bs interpret e n.
```

На сегодняшний день с наиболее полным формальным описанием семантики *BSPLib* можно ознакомиться в работе [6], где предлагается операционная семантика языка *BSP-IMP*, состоящего из нескольких конструкций, типичных для императивных языков программирования, а также операций *get* и *put*, схожих с *bsp_get* и *bsp_put*, и [20], где предлагается расширение классического языка *IMP*, используемого во многих курсах языков программирования за рубежом. Он обладает очень простой семантикой и моделью памяти.

Заключение. В ходе подготовки статьи получены следующие результаты:

1. Выполнен аналитический обзор по проблеме актуальности верификации параллельных программ. Обоснован выбор модели построения блочно-синхронных параллельных программ для создания надежного и высокопроизводительного программного обеспечения. Выявлены такие случаи, когда формальная верификация программного обеспечения целесообразнее тестирования.

2. Выполнен обзор актуальных публикаций зарубежных авторов, занимающихся исследованиями по вопросам верификации блочно-синхронных параллельных программ.

льных программ.

3. Приведено описание семантики языка *BSPC*, аппроксимирующей язык *C* с библиотекой *BSPLib*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шилов Н.В., Городня Л.В., Марчук А.Г. Параллельное программирование среди других парадигм программирования // Прикладная информатика. – 2011. – № 1 (31). – С. 120-129.
2. Основы параллельного программирования: учебно-методическое пособие / С. А. Немнюгин. – Санкт-Петербург: Соло, 2007. – 103 с.
3. Городня Л.В. О классификациях парадигм программирования и параллельном программировании // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – № 2 (14). – С. 138-144.
4. Sun C., Ellis C. Operational transformation in real-time group editors: issues, algorithms, and achievements // CSCW '98: Proceedings of the 1998 ACM conference on Computer supported cooperative work November 1998 Pages 59–68 <https://doi.org/10.1145/289444.289469>.
5. Котов В.Е. Проблемы развития параллельного программирования // Проблемы информатики. 2016. – № 2 (31). – С. 70-78.
6. W.F. McColl "Scalability portability and predictability: The BSP approach to parallel programming" Future Generation Computer Systems vol. 12 pp. 265-272 1996.
7. J. M. D. Hill, B. McColl, D. C. Stefanescu, M. W. Goudreau, K. Lang, S. B. Rao, T. Suel, T. Tsantilas, and R. Bisseling, *BSPLib: The BSP Programming Library, Parallel Computing*, 24 (1998), pp. 1947–1980.
8. Julien Tesson, Frédéric Loulergue. Formal Semantics for the DRMA Programming Style Subset of the BSPLib Library. Seventh International Conference on Parallel Processing and Applied Mathematics (PPAM 2007), Workshop on Language-Based Parallel Programming Models, Sep 2007, Gdansk, Poland. pp.1122-1129, DOI: 10.1007/978-3-540-68111-3_119.
9. Roy K. Leakage Current Mechanisms and Leakage Reduction Techniques in DeepSubmicrometer, Vol. 91, №. 2, 2003. pp. 305-327.
10. A single-atom transistor | Nature Nanotechnology [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nature.com/articles/nnano.2012.21> (дата обращения: 1.11.2021).
11. Hill J.M.D., McColl W.F. Questions and answers about BSP // Scientific Programming, Vol. 6, No. 3, 1997. pp. 249-274.
12. The Apache Software Foundation Announces Apache™ Spark™ as a Top-Level Project: The Apache Software Foundation Blog [Электронный ресурс]. – URL: https://blogs.apache.org/foundation/entry/the_apache_software_foundation_announces50 (дата обращения: 1.11.2021).
13. Gropp W., Lusk E., Skjellum A. Using MPI: Portable Parallel Programming with the Message Passing Interface, 1994.
14. Богословский Н.Н., Данилкин Е.А. Массовый открытый онлайн-курс «Введение в параллельное программирование с использованием OPENMP и MPI» // Хроники объединения фонда электронных ресурсов Наука и образование. – 2016. – № 7 (86). – С. 13.
15. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии MPI. – М.: МИУ, 2004. – 71 с.
16. Жидиков В.П. Модели параллельного программирования для организации массовых параллельных вычислений // Телекоммуникационные и вычислительные системы: Труды конференции. – 2015. – С. 174-175.
17. What Bulk Synchronous Parallel (BSP) software tools have been developed? - Quora [Электронный ресурс] URL: <https://www.quora.com/unanswered/What-Bulk-Synchronous-Parallel-BSP-software-tools-have-been-developed> (дата обращения: 1.11.2021).
18. Title Software Foundations. Authors Benjamin C. Pierce, Chris Casinghino, Michael Greenberg, Vilhelm Sjberg, Brent Yorgey. Publisher: University of Pennsylvania, 2013.
19. Reynolds J.C. Separation Logic: A Logic for Shared Mutable Data Structures // LICS'02, 2002.
20. Gava F., Fortin J. Two Formal Semantics of a Subset of the Paderborn University BSPLib // Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-based Processing, 2009. pp. 44-51.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00516 А.

Статья поступила в редакцию 05.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 681.5.011

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0009

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МОДЕЛИ СИСТЕМЫ СТИМУЛИРОВАНИЯ ППС В ВУЗЕ

© 2021

Никulin Павел Андреевич, аспирант кафедры «Цифровая экономика»

Брянский государственный технический университет

(241012, Россия, г. Брянск, бул. 50-летия Октября, 7, e-mail: nik28.nikulin@yandex.ru)

Аннотация. Целью данной работы является постановка задачи управления, применительно к модели системы стимулирования профессорско-преподавательского состава (ППС) в вузе. Для достижения поставленной цели потребуется решить следующие задачи: описать предмет исследования с приведением теоретико-множественной модели разрабатываемой модели системы; показать схематичное изображение модели системы материального стимулирования ППС вуза с последующим описанием элементов, их функций и взаимосвязей между ними; дать классификацию существующих в системе материального стимулирования ППС вуза выплат, надбавок и премий с ее последующей формализацией. Методы исследования базируются на методах теории управления, принятия решений, нечеткой логики, сравнительного анализа, иерархической классификации, теоретико-множественного подхода. Автором приводится формализованная теоретико-множественная математическая модель системы оплаты труда профессорско-преподавательского состава вуза, анализируется система мотивации профессорско-преподавательского состава вуза, которая состоит из стимулирующих выплат, надбавок, премий, а также приводится ее математическая модель, основанная на теоретико-множественном подходе. Объект исследования был классифицирован по управлению составом – приведена структура моделируемой системы, по управлению структурой – описаны функции каждого элемента системы, с точки зрения институционального подхода – показано влияние нормативно-правовых актов на объект исследования, с точки зрения мотивации – показана роль данного механизма управления в анализируемой системе, с точки зрения информационного описания модели – описано функционирование данного типа управления в системе. В результате в терминах теории управления социально-экономическими системами была сформулирована, применительно к объекту исследования, задача управления как по отдельным элементам, принимающим решения в системе, так и общая.

Ключевые слова: система оплаты труда профессорско-преподавательского состава вуза, теоретико-множественная модель, задача управления в социально-экономической системе.

STATEMENT OF CONTROL PROBLEMS APPLICABLE TO THE MODEL OF THE STIMULATION SYSTEM FOR TEACHERS IN THE UNIVERSITY

© 2021

Nikulin Pavel Andreevich, postgraduate student of “Digital Economy”

Bryansk State Technical University

(241012, Russia, Bryansk, 50-letiya Oktyabrya Blvd., 7, e-mail: nik28.nikulin@yandex.ru)

Abstract. The purpose of this work is to formulate the management problem in relation to the model of the incentive system for the teaching staff (PPP) in the university. To achieve this goal, it will be necessary to solve the following tasks: describe the subject of research with a set-theoretic model of the system being developed; show a schematic representation of the model of the material incentive system for the teaching staff of the university with a subsequent description of the elements, their functions and the relationship between them; to give a classification of payments, allowances and bonuses existing in the system of material incentives for the teaching staff of the university, with its subsequent formalization. Research methods are based on the methods of management theory, decision-making, fuzzy logic, comparative analysis, hierarchical classification, set-theoretic approach. The author provides a formalized set-theoretical mathematical model of the remuneration system for the teaching staff of the university, analyzes the system of motivation for the teaching staff of the university, which consists of incentive payments, allowances, bonuses, and also provides its mathematical model based on the set-theoretical approach. The object of the research was classified according to the composition management – the structure of the modeled system is given, the structure management – the functions of each element of the system are described, from the point of view of the institutional approach - the influence of regulatory legal acts on the research object is shown, from the point of view of motivation – the role of this management mechanism in the analyzed system, from the point of view of the informational description of the model, the functioning of this type of control in the system is described. As a result, in terms of the theory of management of socio-economic systems, in relation to the object of research, the task of management was formulated both for individual elements making decisions in the system, and for the general one.

Keywords: the system of remuneration of the teaching staff of the university, the set-theoretic model, the problem of management in the socio-economic system.

Введение. В рамках проводимой в настоящее время государственной политики в образовательной сфере целью которой является повышения качества подготовки выпускников вузов, а так как данная задача находится в прямой зависимости от эффективности работы профессорско-преподавательского состава (ППС) и вследствие этого поднимается вопрос о совершенствовании модели мотивации ППС вуза.

Целью данной работы является постановка задачи управления, применительно к модели системы стимулирования профессорско-преподавательского состава (ППС) в вузе. Для достижения поставленной цели потребуется решить следующие задачи:

1) описать предмет исследования с приведением теоретико-множественной модели разрабатываемой модели системы;

2) показать схематичное изображение модели системы материального стимулирования ППС вуза с последующим описанием элементов, их функций и взаимосвязей между ними;

3) дать классификацию существующих в системе материального стимулирования ППС вуза выплат, надбавок и премий с ее последующей формализацией;

4) сформулировать задачу управления, применительно к объекту исследования.

Так, исходя из целей и содержания статьи были проанализированы литературные источники показывающие примеры типичных моделей системы оплаты труда ППС вуза. Так, в статье Гуковой А.В. «Модель формирования фонда оплаты труда профессорско-преподавательского состава вузов» приводится дескриптивно-финансовая модель организации ВО позволяющую отобразить распределение ФОТ ППС пропорционально доле структурного подразделения в реализации учебного процесса каждой образовательной программы [2]. Кизитова Н.А. в статье «Динамическая модель формирования фонда оплаты труда профессорско-преподавательского состава вузов» предложила динамическую модель формирования фонда оплаты труда ППС на основе учебных планов образовательных программ [3]. Кубанцова О.В. в статье «Методика управления расходами на заработную плату в учреждениях высшего профессионального образования» привела модель укрупненной структуры расходов вуза по итогам которой был получен коэффициент эффективности управления расходами на заработную плату позволяющий определить оптимальное соотношение фондов заработной платы ППС ВУЗа [4].

Таким образом, видно, что в основной своей массе модели описывающие систему оплаты труда ППС вуза рассматриваются с точки зрения подходов используемых в экономико-финансовом анализе. И так как систему оплаты труда ППС вуза можно представить как иерархическую систему, то в таком случае в данной статье в качестве методологии исследования будут использоваться методы описанные в таких работах по теории управления как «Введение в теорию управления организационными системами» Буркова В.Н. и «Теория управления (дополнительные главы)» Новикова Д.А на основе которых можно представить

формализованную модель системы оплаты труда ППС вуза [1, 8].

Материалы и результаты исследования. Предмет исследования можно представить в виде организационной системы, состоящей из взаимосвязанных элементов, выполняющих определенные функции и таким образом его можно представить схематично и формализовать, опираясь при этом на теорию управления [7].

Таким образом, общий вид модели системы материального стимулирования ППС вуза ($СУ_{зп\text{ ППС}}$) можно описать, основываясь на теоретико-множественный подход и будет выглядеть следующим образом:

$$СУ_{зп\text{ ППС}} = \{L, U, P, G, F, C, \varepsilon\} \quad (1)$$

Где L – множество элементов системы управления $L = \{OU, YU, CY, BC \{KV_s | s=1\}, \{IU_v | v=1, 2\}\}$, где OU – объект управления (ППС вуза), YU – устройство управления (СППР «Вектор»), CY – субъект управления (ППР ВУЗа), BC – внешняя среда к которой относится два измерительных устройства $\{IU_v | v=1, 2 \in BC\}$ $KV_s (s=1)$ – одно контролирующее устройство, U – множество управляющих воздействий на OU , P – множество выходных координат связывающих контрольное устройство (система мониторинга ВУЗа) с внешней средой ($IU_v | v=1, 2$) и таким образом образуя обратную связь, G – множество воздействующих влияний на подсистему принятия решений (YU, CY), F – множество воздействий внешней среды на OU через подсистему принятия решений, C – обратная связь к которой с одной стороны относится P , а с другой – ε характеризующую взаимосвязь KV_s и подсистему принятия решений [6, 9, 10].

Таким образом, на основе всего вышеописанного можно составить схематичное изображение модели системы, которое приведено на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1, объект управления (ППС вуза) в качестве входного сигнала имеет $U(t)$, которое относится к множеству U управляющих воздействий (заработная плата и стимулирующие выплаты ППС) исходящих от подсистемы принятия решений (YU – СППР «Вектор», CY – ППР вуза) которая в свою очередь испытывает воздействующее влияние $g(t)$ (федеральные нормативные и правовые акты, а также мониторинги эффективности вузов) относящейся к множеству G . [11] Возвращаясь к объекту управления (OU) следует сказать, что в качестве его выходного сигнала выступает $y(t)$ характеризующейся множеством Y – информацией о степени выполнения ППС целевых показателей передаваемой в (KV) (система мониторинга ВУЗа), где два выходных сигнала в виде обратной связи первый из которых (P) отображает передачу информации о выполненных целевых показателях во внешнюю среду ($IU_v | v=1, 2$), где под IU_v понимается Минобрнауки осуществляющее мониторинг динамики выполнения госзадания, а IU_2 (Казначейство) в свою очередь осуществляет контроль за движением денежных средств в ВУЗе, а вторая обратная связь передает соответствующую информацию в подсистему принятия решений (ε) и, таким образом, данный элемент корректирует управляющие воздействие в соответствии с состоянием системы [12].

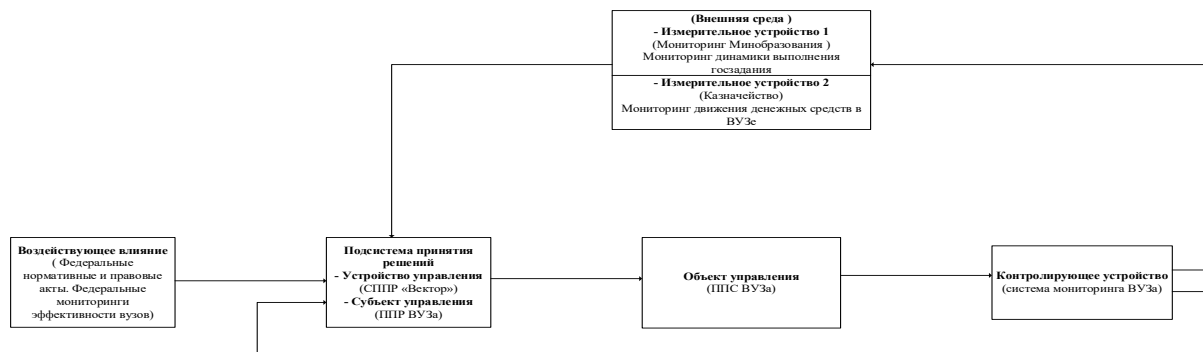


Рисунок 1 – Схематичное изображение модели системы стимулирования ППС ВУЗа

В качестве выходного сигнала у внешней среды связывающей ее с подсистемой принятия решения выступает f характеризующая бюджетные субсидии на выполнение госзадания. Следует отметить тот факт, в разрабатываемую модель системы вводится понятие дискретного времени t_n , где n – шаг времени (период), который равняется кварталу (3 месяца) – данный выбор обусловлен тем, что распределение фонда заработной платы проходит поквартально [13].

Формализация объекта управления. Объект управления отображает ППС вуза получающую заработную плату, а также стимулирующие надбавки, выплаты и премии различного вида. Так, в общем виде математическую модель заработной платы ППС можно представить следующим образом: $Z/P = (Okl. + монит.$

$нит. * Km) + H_{200\%}$, где $Okl.$ – оклад, $монит.$ – надбавка за эффективную деятельность, $Km.$ – повышающий коэффициент, зависящий от наличия ученого степени и звания, $H_{200\%}$ – надбавка в соответствии с Указами Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 г. № 597, от 1 июня 2012 г. № 761, от 28 декабря 2012 г. № 1688 [14].

Стимулирующие выплаты (B), надбавки (H), премии (P) можно описать в виде множеств $B = \{B_{1j}, \dots, B_{ij}\}$, $H = \{H_{1j}, \dots, H_{ij}\}$, $P = \{P_{1j}, \dots, P_{ij}\}$ [15].

Управляющее воздействие на ОУ отображает стимулирующие выплаты, надбавки и премии, которые в целях формализации необходимо классифицировать. Так, классификация видов материального стимулирования ППС вуза представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификатор стимулирующих выплат, надбавок, премий

Группа	Код / Описание
Стимулирующая выплата	V_1 – За интенсивность и высокие результаты работы – стимулирующая выплата для ППС реализующие программы образования, за достижение высоких результатов в учебно-воспитательной работе
Надбавка стимулирующего характера	H_{11} – За интенсивность и достижение высоких результатов в воспитательной и внеучебной работе. H_{12} – За интенсивность и достижение высоких результатов в НИРС. H_{13} – За интенсивность работы и выполнение плановых показателей деятельности университета. H_{14} – За инновационную устремленность, освоение новых технологий и методологий в педагогической и научной деятельности
Стимулирующая выплата	V_2 – За качество выполняемых работ
Надбавка стимулирующего характера	H_{21} – Надбавка работникам, имеющим знаки отличия Министерства науки и высшего образования РФ. H_{22} – Надбавка работникам, имеющим почетные звания. H_{23} – Надбавка работникам, имеющим награды. H_{24} – Надбавка работникам, имеющим спортивное звание «Заслуженный мастер спорта РФ / СССР». H_{25} – Надбавка работникам, имеющим спортивное звание «Мастер спорта РФ / СССР». H_{26} – Надбавка за ученое звание «Профессор РАН». H_{27} – Работник заключил с вузом договор о полной материальной ответственности. H_{28} – За образцовое качество выполняемых работ. H_{29} – За работу и представительство вуза в составе комиссий и советов Минобрнауки РФ, Рособнадзора и т.д. H_{210} – За качественное руководство учебно-методической работой кафедры. H_{211} – За выполнение особо важных и срочных работ
Стимулирующая выплата	V_3 – За стаж непрерывной работы
Стимулирующая выплата	V_4 – Премияльные выплаты по итогам работы
Премияльная выплата	P_{11} – По итогам работы (за месяц, квартал, полугодие, 9 месяцев, год). P_{12} – Работникам уходящим на пенсию в год достижения пенсионного возраста и имеющим стаж работы в университете. P_{13} – Работникам университета предложившим внебюджетный источник дохода и реализовавшим его
Стимулирующая выплата	V_5 – Стимулирующие выплаты в рамках эффективного контракта – договора между работодателем и работником, в котором указаны трудовые функции работника, условия оплаты труда и назначения стимулирующих выплат в зависимости от результатов труда и качества оказываемых государственных услуг, а также меры социальной поддержки
Стимулирующая выплата	V_6 – Обязательные выплаты стимулирующего характера
Надбавка стимулирующего характера	H_{31} – За исполнение обязанности заведующего кафедрой. H_{32} – За исполнение обязанностей декана факультета. H_{33} – За исполнение обязанностей заместителей декана факультета. H_{34} – За исполнение обязанностей секретаря ученого совета университета
Стимулирующая выплата	V_7 – Поощрительные стимулирующие выплаты (премии)
Премияльная выплата	P_{21} – Регулярные поощрительные выплаты (премии) по итогам работы вуза в целом (за месяц, квартал, полугодие, 9 месяцев, год). P_{22} – Разовые поощрительные выплаты (премии разового характера)

Таким образом, основываясь на таблице 1 можно вывести формализованную общую модель объекта управления основываясь на теоретико-множественном подходе. Так, видно, что надбавки (H_{ij}) и премии (Π_{ij}) взаимосвязаны со стимулирующими выплатами (B_i) и таким образом стимулирующие выплаты, надбавки и премии можно представить в виде системы теоретико-множественных моделей:

$$\begin{cases} B_1 = \{H_{11}, H_{12}, H_{13}, H_{14}\} \\ B_2 = \{H_{21}, H_{22}, H_{23}, H_{24}, H_{25}, H_{26}, H_{27}, H_{28}, H_{29}, H_{210}, H_{211}\} \\ B_3 = \emptyset \\ B_4 = \{\Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{13}\} \\ B_5 = \emptyset \\ B_6 = \{H_{31}, H_{32}, H_{33}, H_{34}\} \\ B_7 = \{\Pi_{21}, \Pi_{22}\} \end{cases}$$

Где B_1 – множество надбавок относящихся к стимулирующей выплате за интенсивность и высокие результаты работы, B_2 – множество надбавок относящихся к стимулирующей выплате за качество выполняемых работ, B_3 – стимулирующая выплата за стаж непрерывной работы, B_4 – множество премиальных выплат по итогам работы, B_5 – стимулирующая выплата в рамках эффективного контракта, B_6 – множество надбавок принадлежащей к обязательной выплате стимулирующего характера, B_7 – множество поощрительных премиальных выплат стимулирующего характера. Таким образом, основываясь на всем вышесказанном можно сделать вывод, что теоретико-множественная модель математическую модель объекта управления – $OU = \{O, K, B, H, \Pi, H_{200\%}\}$, где O – оклад, K – повышающий коэффициент, B – стимулирующие выплаты ($B = \{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7\}$), H – стимулирующие надбавки ($H_{ij} \subset B$), Π – премиальные выплаты ($\Pi_{ij} \subset B$), $H_{200\%}$ – надбавка 200% [16].

Постановка задач управления. Процесс постановки задач управления можно составить из двух этапов. На первом этапе опираясь на работы Новикова Д.А. провести сопоставление между методами управления и системой, приведенной на рисунке 1. Так, Новиков выводит следующие методы управления: составом – отвечающим на вопрос кто или что входит в систему (Подсистема принятия решений состоящий из устройства и субъекта управления, воздействующего влияния, объекта управления, контролирующего устройства, внешней среды и двух измерительных устройств), структурой – какие функции выполняют элементы системы (Подсистема принятия решений – осуществляет управляющие воздействия на объект управления в виде заработной платы и стимулирующих выплат, объект управления – отображает ППС получающую заработную плату и стимулирующие выплаты в виде входного сигнала, а роль выходного соответственно выполняет степень выполнения плановых показателей ППС вуза, контролирующее устройство – характеризует систему мониторинга вуза контролирующее поступающую информацию о степени выполнения ППС целевых показателей с последующей ее преобразованием в два выходных сиг-

нала связывающих КУ с подсистемой принятия решений тем самым регулируя управляющее воздействие на ОУ и внешней средой), выходной сигнал внешней среды отображающие бюджетные субсидии вузу зависит от входного, то есть объем финансирования вуза зависит от степени выполнения планового задания, воздействующее влияние посредством воздействия на подсистему принятия решений затрагивает всю систему в целом.

В случае с объектом исследования институциональное управление строится на нормативно-правовых актах регулирующих сферу оплаты труда в образовательных организациях. Мотивационное управление затрагивает непосредственно порядок получения ППС стимулирующих выплат регулируемым внутривузовскими локальными нормативными актами [2]. Так как объектом информационного управления служит информация, которая находится в распоряжении каждого элемента системы на момент принятия решения – это можно проиллюстрировать следующим образом, так, ИУ и КУ получают информацию о выполнении ППС плановых показателей вуза на основе которой осуществляется управление влияющее на всю систему в целом [17]. Таким образом, основываясь на всем вышесказанном можно поставить задачу управления. Видно, что каждый элемент системы выполняют определенную функцию и ввиду этого каждому элементу принимающего решения или влияющих на него можно присвоить задачу управления. Так, задачу мониторинга и анализа текущего состояния выполняет ИУ и КУ, задачу планирования и мотивации выполняет центр принятия решения. Таким образом, можно вывести общую задачу управления для всей системы «нахождение такого состояния системы, которое отвечало бы критериям оптимальности при переходе S в S^* ». Так, к критериям оптимальности относится максимизация управляющего сигнала (заработная плата и стимулирующие выплаты) в объект управления для повышения мотивации ППС достигать плановых показателей выполнения работ.

Заклучение. Таким образом, в данной статье поставлена задача управления, применительно к модели системы стимулирования профессорско-преподавательского состава (ППС) в вузе; дано описание предмета исследования с приведением теоретико-множественной модели разрабатываемой модели системы; показана схематично модель системы материального стимулирования ППС вуза с последующим описанием элементов, их функций и взаимосвязей между ними; дана классификация существующих в системе материального стимулирования ППС вуза выплат, надбавок и премий с ее последующей формализацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бурков, В.Н. Введение в теорию управления организационными системами / В.Н. Бурков, Н.А. Коргин, Д.А. Новиков. – М.: Либроком, 2009. – 264 с.
2. Гукова, А.В. Модель формирования фонда оплаты труда профессорско-преподавательского состава вузов / А.В. Гукова, А.В. Дорждеев, Н.А. Кизатова [и др.] // Финансовая аналитика: проблемы и решения. – 2015. - № 46 (2-11). – С. 2-11.

3. Кизатова, Н.А. Динамическая модель формирования фонда оплаты труда профессорско-преподавательского состава вузов / Н.А. Кизатова // Современная экономика: проблемы и решения. – 2016. - № 7(79). – С. 15-27.
4. Кубанцева, О.В. Методика управления расходами на заработную плату в учреждениях высшего профессионального образования / О.В. Кубанцева // Бизнес. Образование. Право. Вестник Волгоградского института бизнеса. – 2010, - №2(12). – С. 33-38.
5. Турик, Е.С. Мотивация и стимулирование профессорско-преподавательского состава высшей школы в условиях модернизации / Е.С. Турик // Вестник ТвГУ. - №2. – 2016 г. – С. 120-125.
6. Аверченкова, Е.Э. Особенности оценки эффективности управления региональной социально-экономической системой с позиций теории управления / Е.Э. Аверченкова // Информатизация и связь. - №2. – 2020 г. – С 7-13.
7. Новиков Д.А. Методология управления / Д.А. Новиков – М.: Либроком, 2011. – 128 с.
8. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков – М.: Издательство физико-математической литературы, 2012. – 604 с.
9. Новиков Д.А. Механизмы управления / Д.А. Новиков – М.: Лкнанд, 2011. – 192 с.
10. Новиков Д.А. Стимулирование в организационных системах / Д.А. Новиков – М.: Синтез, 2003. – 312 с.
11. Тараканов В.В. Финансовый механизм системы высшего профессионального образования: от трансформации к модернизации / В.В. Тараканов – Волгоград: ВолГУ, 2009. – 334 с.
12. Халин В.Г. Финансирование российской высшей школы: состояние и перспективы / В.Г. Халин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 5: Экономика. – 2011. - №1. – С. 47-53.
13. Леонов Г.А. Теория управления / Г.А. Леонов – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. – 233 с.
14. Генкин Б.М. Экономика и социология труда: учеб. для вузов / Б.М. Генкин. – М.: Норма, 2007. – 156 с.
15. Тараканов В. В. Модернизация финансовой политики университетов Европы в конце XX начале XXI века / В.В. Тараканов // Вестник ВолГУ. Сер. 3. Экономика. Экология. 2012. №1. – С. 29-38.
16. Халин В.Г. Вопросы бюджетного финансирования оплаты труда профессорско-преподавательского состава вузов Российской Федерации / В.Г. Халин // Экономические науки. 2006. № 18. – С. 89-96.
17. Халин. В. Г. Финансовое обеспечение государственных образовательных услуг в российской высшей школе в условиях инновационной экономики / В.Г. Халин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 5. Экономика. 2012. № 4. – С. 94-114.

Статья поступила в редакцию 15.09.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 004.946

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0010

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИМИТАТОРА ТЕПЛОВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ТРЕНАЖЁРА

© 2021

Роганов Владимир Робертович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационные технологии и системы»

Есимова Нурзипа Сапаровна, аспирант кафедры «Информационные технологии и системы»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: vladimir_roganov@mail.ru)

Пышкина Ирина Сергеевна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно вычислительные системы»

Кувшинова Ольга Александровна, аспирант кафедры «Информационно вычислительные системы»
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, e-mail: oly791702@mail.ru)

Аннотация. Последние достижения науки и техники привели к появлению новых навигационных приборов. Одним из таких приборов является тепловизор, устанавливаемый на летательные аппараты и беспилотные летательные аппараты. Соответственно, появилась задача обучать лётчиков при полётах на авиационных тренажёрах и операторов беспилотных летательных аппаратов. Для определения места нахождения летательного аппарата по визуально наблюдаемому изображению модели местности, такая задача решается как наблюдением местности через остекление кабины, так и за счёт наблюдения инфракрасного изображения местности на экране тепловизора. Для обучения лётчиков решению задач самолётовождения с наблюдением моделей реперных объектов через остекление кабины были разработаны имитаторы визуальной обстановки, синтезирующие в реальном масштабе времени визуально наблюдаемые 3D-модели с возможностью при этом профессионально тренировать их глазомер. Решению задач самолётовождения с наблюдением моделей реперных объектов, наблюдаемых в имитаторах тепловизора, в настоящее время не решена. Причиной является невозможность в режиме реального времени (с циклом смены информации 80 мсек.) синтезировать узнаваемую инфракрасную модель 3D-объекта, используя известные методики учёта теплового излучения с поверхности рассматриваемого 3D-объекта. Однако, если использовать метод моделирования инфракрасной модели 3D-объекта, считая, что будем синтезировать не 3D-объект, а его информационную модель, как это было сделано в середине XX века при моделировании 2D-проекций 3D-объектов в визуальном диапазоне световых волн, то задача синтеза моделирования 2D-проекций 3D-объектов в инфракрасном диапазоне может быть решена иначе.

Ключевые слова: машинный синтез информационной модели реперного объекта, тепловизор, авиационные тренажёр, тренажёр оператора беспилотного летательного аппарата

FEATURES OF SIMULATION OF THE SIMULATOR OF THE THERMAL IMAGE OF THE AVIATION SIMULATOR

© 2021

Roganov Vladimir Robertovich, ph.d., associate professor of the
department «Information Technologies and Systems»

Esimova Nurzipa Saparovna, graduate student department «Information Technologies and Systems»
Penza State Technological University
(440039, Penza, Baidukov's passage / str. Gagarin, 1A / 11, E-mail: vladimir_Roganov@mail.ru)

Pyshkina Irina Sergeevna, ph.d, associate professor of the department «Informational computing systems»

Kuvshinova Olga Aleksandrovna, graduate student of the department «Informational computing systems»
Penza State University of Architecture and Construction
(440028, Penza, str. German Titova, 28, E-mail: Oly791702@mail.ru)

Abstract. Recent advances in science and technology have led to the emergence of new navigation devices. One of these devices is a thermal imager installed on aircraft and unmanned aerial vehicles. Accordingly, the task arose to train pilots when flying on flight simulators and operators of unmanned aerial vehicles. To determine the location of the aircraft from the visually observed image of the terrain model, such a task is solved both by observing the terrain through the glazing of the cockpit and by observing the infrared image of the terrain on the thermal imager screen. To train pilots in solving aircraft flying problems with observing models of reference objects through the cockpit glazing, visual environment simulators were developed that synthesize visually observed 3D models in real time with the ability to professionally train their eyes. The solution of the problems of aircraft navigation with the observation of models of reference objects observed in imitators of a thermal imager has not been solved at present. The reason is the impossibility in real time (with a cycle of information change of 80 ms) to synthesize a recognizable infrared model of a 3D object using the well-known methods of accounting for thermal radiation from the surface of the 3D object in question. However, if we use the method of modeling the infrared model of a 3D object, assuming that we will synthesize not a

3D object, but its information model, as was done in the middle of the 20th century when modeling 2D projections of 3D objects in the visual range of light waves, then the problem of synthesis of modeling 2D projections of 3D objects in the infrared range can be solved differently.

Keywords: machine synthesis of the information model of the reference object, the thermal imager, aviation simulator, the simulator of the unmanned aircraft operator.

Введение. Одним из сравнительно новых приборов, используемых для решения задач самолётовождения [1] как у нас в стране, так и за рубежом является тепловизор [2, 3]. Он применяется на разных типах летательных аппаратов как один из модулей навигационной системы самолётов [4] и вертолётов [5, 6]. Задачи обучения лётчиков: обучить выделять из изображений, полученных с помощью тепловизора нужную информацию [7] и использовать её для решения навигационных задач. Значительная часть времени обучения лётчиков отводится на полёты на авиационных тренажёрах [8, 9]. В авиационных тренажерах могут быть несколько имитаторов, синтезирующих визуально наблюдаемые изображения модели местности [10]. Это имитатор визуальной обстановки, синтезирующий визуально наблюдаемую трёхмерную модель местности, видимую через остекление кабины; имитатор тепловизора синтезирующий на своём экране инфракрасное изображение части модели местности, попавшей в камеру наблюдения, и имитатор радиолокатора синтезирующий на своём экране часть модели местности, попавшей в соответствующую камеру наблюдения. В имитаторе визуальной обстановки и в имитаторе радиолокатора могут использоваться физические макеты местности вместе со специальными камерами наблюдения [1, 10]. Литературный обзор показал, что для разработки имитаторов тепловизоров необходимо решить две задачи:

1. Отобрать реперные объекты [1, 10], необходимые для визуальной корректировки места расположения модели летательного аппарата над моделью земной поверхности [11]. Или маскировка таких объектов с целью приближения условий решения навигационных задач при полётах на авиационных тренажерах к реальным [12].

2. Синтезировать в реальном масштабе времени узнаваемые ИК-модели реперных объектов [13].

Наиболее распространённые методы решения второй задачи основаны на учёте интенсивности инфракрасного излучения, испускаемого всеми гранями 3D-объектов с учётом технических характеристик используемых тепловизоров и возможностей их экранов [14–19]. Такой подход не позволяет синтезировать достаточное число реперных объектов для решения задач самолётовождения при полётах на авиационных тренажерах. Анализ литературных источников показывают возможность разработки имитатора тепловизора, используя методы и алгоритмы машинной графики, ранее применённые для разработки имитатора визуальной обстановки [20, 22].

Целью статьи является сравнение технологий синтеза изображений моделей местности наблюдаемых лётчиком через остекление кабины и технологий

изображений местности, наблюдаемых лётчиком на экране имитатора тепловизора при полётах на авиационном тренажёре. Возможность создания имитатора тепловизора, используя методы машинной графики, разработанные для синтеза узнаваемой модели выбранного участка местности видимого через остекление кабины авиационного тренажёра.

Материалы и результаты исследования. Имитатор тепловизора, при полёте на авиационном тренажёре, должен обеспечить лётчика возможностью решать задачи самолётовождения по визуально наблюдаемому инфракрасному изображению модели (ИК-модели) узнаваемой местности. Это предполагает синтез узнаваемого ИК-модели местности (размером 1500×1500 км) в реальном масштабе времени (с циклом не более 80 мсек) [12].

Если сравнивать внешний вид изображение местности, видимой в зрительном диапазоне световых волн на рисунке 1 [23] и изображение местности, видимой в инфракрасном излучении на рисунке 2 [24], то наблюдатель во всех случаях может выделить из общего фона интересующие его объекты и по ним определить своё место положение в пространстве. Изображение 3D-объекта, видимое в световом диапазоне волн, как и изображение его синтезированной модели имеет чётко выраженный рисунок окраса всех его частей в широкой палитре цветов. ИК-изображение 3D-объекта имеет «размытый» окрас его частей и всегда монохромно.



Рисунок 1 – Вид на 3D-модель пространства, окружающего кабину авиационного тренажёра

Первоначально задачу синтеза визуально наблюдаемой на экране компьютера 3D-модели в зрительном диапазоне волн решали с помощью метода, получившего название «моделирование излучательной способности 3D-объекта». В его основе лежит моделирование движений всех световых лучей, отражённых от всех поверхностей 3D-объектов (с учётом особенности их форм и материалов из которого они сделаны), при заданном источнике (или нескольких источниках) освещения, включая отражение света от соседних

поверхностей. Это позволяло синтезировать на 2D-экране высококачественную 2D-проекцию 3D-объекта, близкую к отражению рассматриваемых объектов в зеркале. Методы «моделирования излучательной способности 3D-объекта» предполагают большое число вычислений, что не позволяет их использовать в реальном масштабе времени [20–22].



Рисунок 2 – Вид участка местности на экране тепловизионного летательного аппарата

Для решения задачи синтеза узнаваемой модели местности, видимой через остекление кабины авиационного тренажера, в середине XX века были разработаны требования к имитатору визуальной обстановки авиационного тренажера[25]:

- синтезировать на экране формирования промежуточного изображения в реальном масштабе времени видеоряды из 2D-проекций 3D-объектов с узнаваемой моделью выбранного участка местности, общим размером до 1500×1500 км (для этого разработаны специализированные программно-технические системы, названные «компьютерные генераторы изображения»);

- синтез в компьютерном генераторе изображения узнаваемой части модели местности, попавшей в камеру наблюдения, осуществляются за счёт обработки визуальных примитивов (полигоны и огни) и управляющих примитивов (два вида охватывающих сфер и разделяющие плоскости). Полностью описывающих все составные части моделей 3D-объектов (с учётом вариантов их окрашивания) и изменяемым порядком вызова из базы данных компьютерным генератором изображений с целью исключения на первом этапе синтеза моделей участков местности не попавших в камеру наблюдения и решения задачи исключения просвечивания дальней 3D-модели через ближнюю, при подвижном наблюдателе;

- доставлять в глаза человека высвеченные на экране формирования промежуточного изображения видеоряды из 2D-проекций 3D-объектов через специальные оптические системы активизирующих заданные составляющие зрительного аппарата человека, заставляя его поверить. На рисунке 3 показано, что он видит реальный 3D-объект и может при этом профессионально тренировать свой глазомер.

В отличие от методов «моделирования излучательной способности 3D-объекта», когда моделируется

прохождение максимального числа световых лучей, в компьютерном генераторе изображений обрабатываются визуальные примитивы в несколько этапов. На первом этапе, названном «сценарный процесс» из дальнейшей обработки убирают заключённые в специальные блоки, названные «охватывающими сферами» все примитивы, описывающие часть модели района полётов, не попавшую в камеру наблюдения. На втором этапе, названном «геометрический процесс» синтезируются математические модели 3D-объектов, попавшие в камеру наблюдения с учётом ракурса их проецирования на экране формирования промежуточного изображения. На третьем этапе, названном «клиппирующий процесс», отсекаются «лишние» части математических моделей 3D-объектов, если часть их видна, а часть не видна, так как не попала в камеру наблюдения. На последнем этапе, названном «видеопроцессом» математическая модель преобразуется в сигналы для высвечивания на экране формирования промежуточного изображения 2D-проекций всех моделей 3D-объектов;

- если используется безочковая одноканальная объемная система, то на экране формирования промежуточного изображения должны высвечиваться постоянно изменяемые изображения 2D-проекций моделей местности (в соответствии с движением модели летательного аппарата в модели пространства). Наблюдаемые в углах зрения соответствующие углы камеры наблюдения (это воздействует на конвергенцию зрительного аппарата человека) и настраивающий хрусталик глаза человека «на взор в бесконечность» (это воздействует на аккомодацию зрительного аппарата человека). Это позволяет человеку считать, что он видит реальный 3D-объект и при этом может профессионально тренировать свой глазомер;

- если используется двухканальная объемная система с диспаратными очками, то для каждого глаза человек синтезируется своё изображение в углах зрения соответствующих углов камер наблюдения.

Таким образом, современные имитаторы визуальной обстановки состоят из двух основных узлов – компьютерного генератора изображения с базой данных и ОС, но в технологический процесс синтеза 3D-модели, которую человек воспринимает как реальный 3D-объект включаются определённые составляющие его зрительного аппарата:

- при использовании одноканальной безочковой объемной системой – это аккомодация и конвергенция;

- при использовании двухканальной объемной системой с диспаратными очками – это диспаратность.

При использовании одноканальной безочковой объемной системы на экране формирования промежуточного изображения должен высвечиваться видеоряд, полученный при подвижном наблюдателе, а при использовании объемной системы с диспаратными очками должны высвечиваться изображения отдельно для левого глаза и отдельно для правого глаза.

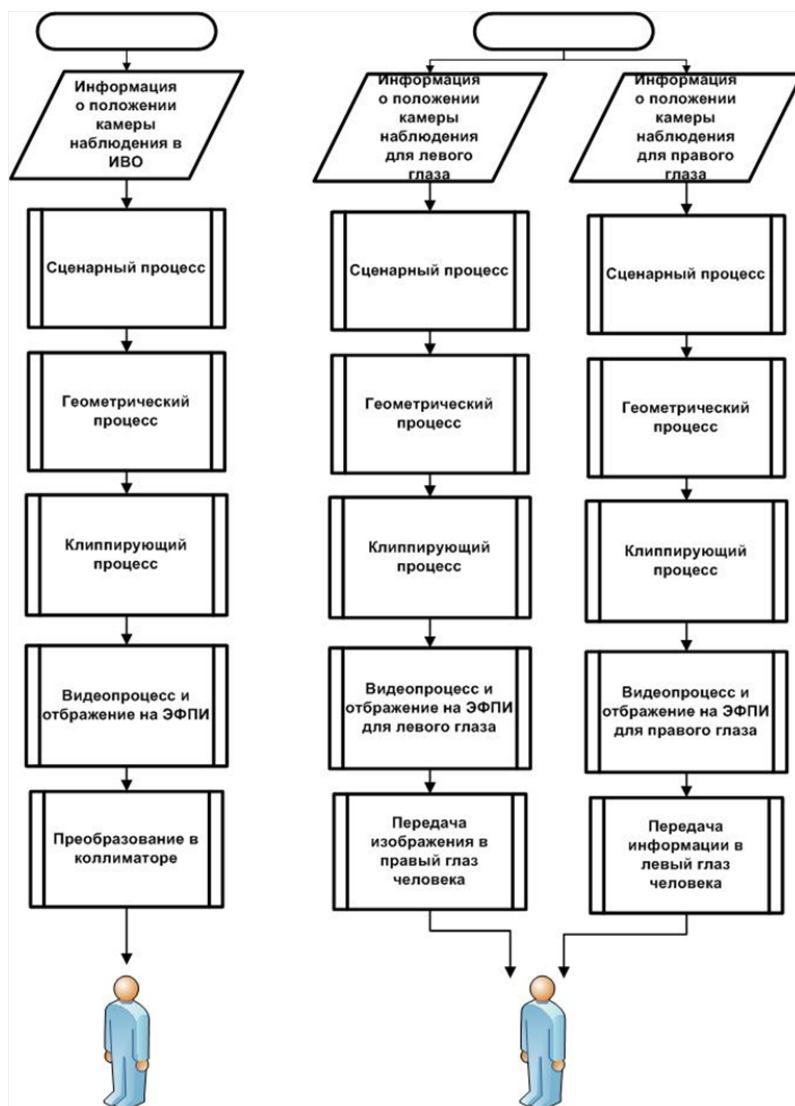


Рисунок 3 – Схема процессов обработки информации в двух типах эргатических оптико-программно-технических систем «Имитатор визуальной обстановки», позволяющих человеку через остекление кабины авиационного тренажёра видеть 3D-изображение местности и тренировать свой глазомер

При использовании одноканального безочковой объемной системы на экране формирования промежуточного изображения должен высвечиваться видеоряд, полученный при подвижном наблюдателе, а при использовании объемной системы с диспаратными очками должны высвечиваться изображения отдельно для левого глаза и отдельно для правого глаза.

Разработанные имитаторы визуальной обстановки позволили, при полётах на авиационном тренажере обучать лётчиков решению таких сложных задач, как визуальная посадка летательного аппарата на виртуальной посадочной полосе и обучение процессу дозаправки летательного аппарата в воздухе. Их успешные решения доказали эффективность замены методов синтеза визуально наблюдаемой модели 3D-объекта. Метод «моделирования излучательной способности 3D-объекта» был заменён на использование методов машинной графики реального времени, когда при синтезе визуально наблюдаемой модели 3D-объекта обрабатывают визуальные и управляющие примитивы. Особенность обработки визуальных примитивов

в учёте ракурса и дистанции их наблюдения, а также методов окрашивания их поверхностей. Это может быть монохромный окрас, не изменяемый на разных дистанциях наблюдения, или окрашивание полигонов с помощью текстуры. Опыты показали, что при использовании текстуры существует две пороговые дистанции. При приближении ближе первой пороговой дистанции изображение текстур расплывается на отдельные пиксели и цветовой рисунок пропадает. При удалении далее второй пороговой дистанции, отдельные цветные пиксели начинают конкурировать между собой, в результате цветовой рисунок теряется. Сложность расчёта дистанции качественного наблюдения моделей поверхностей, окрашенных текстурой привели к тому, что на практике её применяют для окрашивания полигонов на незначительном участке модели земно поверхности, как правило это модель взлетно-посадочной полосы с прилегающей местностью размером не более чем 15×15 км, полёт над которой возможен на высоте 400 м (выше имитируется полёт в «сплошной облачности»). При этом достаточно

чёткое изображение моделей 3D-объектов лётчик видит до высоты 50 м (высота, при достижении которой считается что выполнен взлёт летательного аппарата). Качество синтезированного изображения можно оценить по рисунку 4.



Рисунок 4 – Схема процессов обработки информации в программно-технической системе «Имитатор тепловизора», позволяющего лётчику при полётах на авиационном тренажёре наблюдать узнаваемую ИК-модель местности

В настоящее время, разработка имитатора тепловизора для авиационного тренажера является актуальной задачей, позволяющей обучать лётчика кроме пилотирования летательного аппарата ещё решению задач самолётовождения [1]. Есть попытки применить известные методы синтеза ИК-модели 3D-объекта, основанные на выполнении большого числа вычислений для расчёта яркости свечения каждой выбранной точки поверхности 3D-объекта путём моделирования движения инфракрасных лучей [14–18]. Анализ показал, что такой метод моделирования изображения ИК-модели 3D-объекта является близким аналогом получения изображения в зрительном диапазоне волн модели 3D-объекта методом «моделирования излучательной способности 3D-объекта», что как показала практика является неприемлемым для разработки имитаторов авиационного тренажера, так как требует большого числа вычислений.

При анализе как должна выглядеть ИК-модель местности по сравнению с 3D-моделью, видимой в зрительном диапазоне световых волн определено, что:

- тепловизор, предоставляет лётчику изменять параметры телесного угла камеры наблюдения (в то время как при синтезе 3D-модели видимой в зрительном диапазоне световых волн угловые размеры камеры наблюдения всегда являются константой);

- наблюдаемое в тепловизор изображение местности достаточно быстро меняется и зависит от времени суток, года и погодных условий (ранее при анализе требований к 3D-моделям местности видимой в зрительном диапазоне световых волн также было установлено, что вид местности постоянно меняется в зависимости от положения солнца и времени года,

в итоге было определено, что синтезируем две основных модели земной поверхности в заданное время года – полдень и полночь);

- ИК-модель 3D-объекта и его 3D-модель, видимая в зрительном диапазоне световых волн должны находиться в одной и той же точке модели окружающего пространства.

- моделировать ИК-изображение местности с учётом времени года и жёстко заданного времени суток (интервал моделирования не более часа);

- использовать для решения задачи удаления не видимых в данный момент моделей объектов сегменты, размер и форма которых ранее были разработаны для моделирования для визуально наблюдаемой модели местности, видимой в зрительном диапазоне световых волн;

- моделировать видимые в ИК-диапазоне те же реперные объекты, которые ранее были отобраны для моделирования для визуально наблюдаемой модели местности, видимой в зрительном диапазоне световых волн, но с конструкцией, позволяющей создавать узнаваемые 3D-модели, видимые в ИК-диапазоне с использованием уникального набора разработанных для этих целей текстур [26–28];

Тогда для решения разработки имитатора тепловизора целесообразно использовать компьютерные генераторы изображения 2D-проекции всех моделей 3D-объектов, назначение которого высветить на подключённому к экрану формированию промежуточного изображения видеоряда из 2D-проекции 3D-объектов, конструкция которых и их окрас [29] соответствует решению задачи – моделировать для человека узнаваемые им 3D-объекты, наблюдаемые при полёте на летательном аппарате на экране реального тепловизора.

Заключение. Для создания ИК-модели предлагается использовать программно-техническую систему в состав которой входит компьютерный генератор изображения (разработанный ранее для синтеза визуально наблюдаемой модели местности, видимой в зрительном диапазоне световых волн) и 2D-экран.

Методы подготовки исходной информации, включающие разработку конструкций моделей 3D-объектов, описанных с помощью визуальных и управляющих примитивов и уникального набора текстур, разработанных для окрашивания полигонов ИК-моделей с учётом их наблюдения в заданное время года и жёстко заданного времени суток (не более одного часа).

Модель района полётов для наблюдения через имитатор тепловизора должна включать те же модели реперных 3D-объектов, что и модель полётов этого же участка местности, разработанная для наблюдения в зрительном диапазоне световых волн (могут быть незначительные отклонения).

Модель района полётов для наблюдения через имитатор тепловизора делится на сегменты аналогичные сегментам на которые делиться модели этого же участка местности, разработанная для наблюдения

в зрительном диапазоне световых волн, что решает задачу расположения моделей 3D-объектов в одной и той же точке модели пространства, наблюдаемого в зрительном диапазоне световых волн и в ИК-диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. В.Я. Мамаев, А.Н. Сняжков, К.К. Петров, Д.А. Горбунов. Воздушная навигация и элементы самолётостроения: Учеб. пособие/В.Я. Мамаев, А.Н. Сняжков, К.К. Петров, Д.А. Горбунов// СПбГУАП. СПб., 2002. – 256 с
2. Агеев В.П., Балоев В.А., Иванов В.П., Насыров А.Р., Рагинов С.В. Тепловизионный прицел. Патент на промышленный образец RU 113567, 13.03.2019. Заявка № 2018502342 от 31.05.2018.
3. Nazmееv Munir M., Pavlycheva Nadezhda K. "New generation spectrographs" in Optical Engineering. 1994. Vol. 33.N 8.– pp. 2777-2782.
4. Андрианов С.Н., Зуйков В.А., Калачев А.А., Максимюк В.С., Мирумянц С.О., Самарцев В.В., Трофанчук Л.А., Шереда А.М. Волоконно-оптические системы технического зрения для применения в науке, промышленности и делопроизводстве//Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2002. Т.66.№3. – С. 369-372.
5. Каракозов Ю.А., Селявский Т.В., Сухачев А.Б., Шапиро Б.Л. Вертолётный комплекс современного бортового вооружения. Патент на изобретение 2726301 С1, 13.07.2020. Заявка № 2019126083 от 16.08.2019.
6. Корриган Ф. Десять тепловизоров для дронов и как работает тепловизионная съёмка// Автоматизация и ИТ в энергетике. 2020. № 1 (126). – С. 14-24.
7. Горный В.И., Латыпов И.Ш., Груздев В.Н., Кислицкий М.И. Возможность синтезирования апертуры спутникового тепловизора//Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 7. – С. 25-36.
8. Agachev A.R., Larionov N.P., Lukin A.V., Mironova T.A., Nyushkin A.A., Protasevich D.V., Rafikov R.A. "Computer-generated holographic optics" in Journal of Optical Technology. 2002. Vol. 69. N 12. – pp. 871-878.
9. Roganov V.P., Kuvshinova O.A., Grincov D.M. К вопросу о семиотической составляющей видимой для лёгчика модели пространства за кабиной авиационного тренажёра/В сборнике: Пром-Инжиниринг: труды VI Всероссийской научно-технической конференции. Челябинск, 2020. – С. 63-67.
10. Roganov V.P., Kuvshinova O.A., Четвергова М.В. Программный модуль сортировки названий реперных объектов для формирования тезауруса реперных объектов трёх сцен имитаторов, синтезирующих изображение местности, видимое через остекление кабины авиационного тренажёра, на экране имитатора радиолокатора и на экране имитатора тепловизора/Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020616157, 11.06.2020. Заявка №2020615419 от 28.05.2020.
11. Roganov V., Mikheev M., Esimova N., Babich M., Butaev M., Kukuchkina O. "On the assessment of the image model of 3D models synthesized by optical-software-technical systems" in Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 - Proceedings. 2020. – pp. 9067481.
12. Roganov V.P., Семочкина И.Ю., Жашкова Т.В. Системы моделирования трёхмерных визуально наблюдаемых моделей//Труды международного симпозиума "Надёжность и качество". 2015. Т. 1. – С. 192-196.
13. Зайцев А.В., Соловьев В.А., Кичулкин Д.А., Красавцев О.О. Сравнительная оценка способов обработки цифровых изображений, получаемых с помощью тепловизора при наблюдении беспилотных летательных аппаратов//Цифровая обработка сигналов. 2017. № 3. – С. 50-56.
14. Голобоков М.В., Данилевич С.Б. Оценка достоверности результатов проверки тепловизоров TESTO/В сборнике: Метрология, стандартизация и управление качеством. материалы II Всероссийской научно-технической конференции. 2017. – С. 11-12.
15. Кремис И.И., Толмачев Д.А. Коррекция остаточной неоднородности изображения в тепловизорах второго поколения на основе частотного разложения//Прикладная физика. 2016. № 6. С. 109-115.
16. Пантюшин А.Д., Трофимов К.Д., Немова Т.Н. Особенности эксплуатации и настройки тепловизора при ИК-обследовании/ В сборнике: Избранные доклады 62-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. Томский государственный архитектурно-строительный университет. 2016. – С. 1293-1296.
17. Акименко Т.А., Филиппова Е.В. Тест-объект для контроля параметров тепловизоров//Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. – С. 308-311.
18. Тулаев В.В., Семке А.А., Маслова О.В. Тепловизор оптико-электронной станции "Вереск": оценка возможностей и перспектива применения/в сборнике: Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2018. – С. 63-69.
19. Кияница А.О., Иванова В.В., Колобродов В.Г. Согласование параметров пирозлектрической матрицы и объектива тепловизора// Вестник Хмельницкого национального университета Технические науки. 2015. №1(221). – С. 107-111.
20. Вяткин С.И., Долговесов Б.С. Метод визуализации мультиобъёмных данных и функционально заданных поверхностей с применением графических процессоров//Автометрия. 2021. Т. 57. №2. – С. 32-40.
21. Вяткин С.И., Долговесов Б.С., Есин А.В., Жигач А.А., Чижик С.Е., Щербаков Р.А. Геометрическое моделирование и визуализация функционально заданных объектов//Автометрия. 1999. №6. – С. 84-92.
22. Долговесов Б.С., Городилов М.А., Шадрин М.Ю., Брагин В.И. Особенности реализации обработки, отображения и регистрации мультимедийных данных для тренажерных комплексов ЦПК/Пилотируемые полеты в космос. 2018. № 4 (29). – С. 34-43.
23. https://yandex.ru/images/search?p=3&source=wiz&text=авиационный%20тренажер%20картинки&pos=129&rpt=simage&img_url=https%3A%2F%2Fbte.by%2Fupload%2Fiblock%2Fc8d%2Fc8dbacc7ca069fa4dbbb01ce23941bf.jpg&lr=49 (дата обращения 15.09.2021).
24. <https://www.youtube.com/watch?v=nCxmT6H-4> (дата обращения 15.09.2021).
25. Предтеченский А.Н., Родченко В.В. Метод устранения статических и динамических ошибок воспроизведения движения в телевизионных имитаторах визуальной обстановки// Учёные записки ЦАГИ. Т.8. №2, 1977. – С.61-68.
26. Графикон'92. Сборник трудов международной конференции. М.: АН СССР, 1992. – С. 143.
27. Вяткин С.И., Долговесов Б.С., Каипов Н.Р. Отображение текстуры на плоские и криволинейные поверхности, свободные формы и объёмы//Автометрия. 2002. №1. – С.17-24.
28. Mazurok B.S., Dolgovosov B.S., Artikov T.N., Artikov A.N., Korostelev E.I. "Integrated solution for interactive multimedia presentations" in 23rd International Conference on Computer Graphics and Vision, GraphiCon 2013 - Conference Proceedings. 23. 2020. – pp. 152-155.
29. Elykov N.A., Belago I.V., Kuzikovskij S.A., Nekrasov Yu.Yu. On the approach to visual simulation of dynamic sea surface//Avtometriya. 2001. №2. – pp. 51-65.

Статья поступила в редакцию 23.09.2021
Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 005.5:004.9

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0011

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРОЦЕССА СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

© 2021

Ерженин Роман Валерьевич, кандидат экономических наук, генеральный директор
ООО «НПЦ ГОСУЧЕТ»

(143441, Московская область, Красногорский р-н, 69 км МКАД, п/о Путилково, офисно-общественный
комплекс ЗАО «Гринвуд», стр. 19, e-mail: rerzhenin@gmail.com)

Аннотация. В условиях развития цифрового госуправления все более актуальной становится проблема неразвитости методологии макропроектирования, на этапах которого происходит формирование видения модели сложной организационно-технической системы, определяются стратегические цели использования информационных технологий, методы и способы реализации технической политики. Цель статьи - сформировать базовый методологический аппарат, обеспечивающий процесс стратегического управления крупномасштабной государственной информационной системы управления ГИСУ. Для формирования комплексного представления о стратегии и управления ГИСУ в исследовании предложены описания ряда основных общеметодологических понятий (методология стратегического управления, моделирование, модель, цель моделирования, процесс стратегического управления), а также схематическое отображение модели единства стратегии, методологии и экспертирования, и модели процесса стратегического управления развитием ГИСУ. На основе разработанного понятийного аппарата даны определения базовым методологическим принципам процесса стратегического управления ГИСУ. Факторы новизны предлагаемых подходов к решению проблемы неразвитости методологии макропроектирования заключаются в использовании терминологических описаний и схематических отображений с целью формирования области знаний о стратегическом управлении сложной ГИСУ. Последовательное развитие этого знания позволит сформировать основы нормативной методологии, как набора предписаний и норм, соблюдение которых как раз и необходимо для обеспечения рациональности и целенаправленности в процессах управления сложной информационной системы в сфере госуправления. По мнению автора, предложенный методологический аппарат поможет определить роли на этапах проектирования сложной системы, повысить ответственность, понизить уровень неопределённости и вероятности наступления рисков.

Ключевые слова: моделирование, макропроектирование, госуправление; нормативная методология; ИТ; ГИС.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGICAL APPARATUS FOR THE PROCESS OF STRATEGIC MANAGEMENT OF THE DEVELOPMENT OF THE STATE INFORMATION SYSTEM

© 2021

Erzhenin Roman Valerievich, phd in economic sciences, general director
LLC "SPC GOSUCHET"

(143441, Moscow region, Krasnogorskiy district, 69 km of MKAD, Putilkovo p / o, office and public complex of CJSC
"Greenwood", p. 19, e-mail: rerzhenin@gmail.com)

Abstract. In the context of the development of digital public administration, the problem of the underdevelopment of the macro-design methodology becomes more and more urgent, at the stages of which the vision of a model of a complex organizational and technical system is formed, the strategic goals of using information technologies, methods and ways of implementing technical policy are determined. The purpose of the article is to form and describe the basic methodological apparatus that ensures the process of strategic management of the state information management system of GISU. In order to form a comprehensive idea of the management strategy of GISU, the study offers descriptions of a number of basic general methodological concepts (strategic management methodology, modeling, model, modeling goal, strategic management process), as well as a schematic representation of the model of unity of strategy, methodology and expertise, and a model of the strategic management process development of GISU. On the basis of the developed conceptual apparatus, definitions are given to the basic methodological principles of the strategic management process of GISU. The proposed principles, language descriptions and schematic representations of the knowledge model about the process of strategic management of GISU form the basis of the subject area of methodological knowledge about modeling a complex system. The consistent development of this knowledge will make it possible to form the foundations of a normative methodology, as a set of prescriptions and norms, the observance of which is precisely necessary to ensure rationality and purposefulness in the management processes of a complex information system in the field of public administration. The lack of general principles, norms and requirements for the management process of GISU, according to the author, generates collective irresponsibility, which creates conditions for increasing the degree of uncertainty and the likelihood of risks.

Keywords: modeling; macro design; public administration; normative methodology; IT; GIS.

Введение. Вопросы взаимодействия управленцев и профильных специалистов (математиков, консультантов, ИТ-специалистов) при использовании моделирования в процессах принятия проектных решений уже давно являются одной из ключевых составляющих проблемы развития современного государственного ИТ-менеджмента. На то, что многие финансовые и интеллектуальные ресурсы организации тратятся на «ритуальное» моделирование, не оказывающее влияние на принятие управленческих решений отмечали А.А. Самарский и А.П. Михайлов [1] еще в 1997 году, а в 2007-ом Е.А. Питухин посвятил этой проблеме отдельное диссертационное исследование [2], где сравнил моделирование с «черной магией», которую управленцы по-прежнему не воспринимают достаточно серьезно.

Неприятие моделирования ИС в сфере государственного управления объясняется сформированной годами привычкой, так как на начальном этапе развития средств «персонализированной автоматизации» переход знаний от пользователя к сознанию разработчика происходил достаточно несложно, без необходимости использования моделей. Сложность возлагаемых на ИС функций увеличила масштабность самих систем и, как следствие, повысила класс постановки задач до класса проблем принятия проектных решений, которые стали объединять целые коллективы заказчиков и разработчиков ИС.

Общее скептическое отношение управленцев к моделированию приводит к многочисленным провалам в реализации проектов различного масштаба по созданию государственных информационных систем [3]. Результаты ИТ-проектов, осуществляемых в реальной управленческой ситуации, достаточно часто становятся примерами нежизнеспособности экспериментальных моделей программных систем. К их числу можно отнести самую дорогостоящую ГИИС «Электронный бюджет» [4], а также ИС Счетной Палаты РФ [5, 6], ИС Прокуратуры РФ [7], ИС Следственного комитета РФ [8] и т.п.

Между тем долгосрочный прогноз научно-технологического развития РФ [9] относит предсказательное моделирование сложных систем к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники. В среднесрочном горизонте ожидается развитие средств управления проектированием сложных систем и появление исследовательских моделей с новыми принципами организации взаимодействия «человек – компьютер». Таким образом можно предположить, что в условиях развития цифрового государственного управления, цифровых платформ и больших экосистем, все более актуальным становится развитие методологии макропроектирования, на этапах которого как раз и происходит формирование виденья развития сложной ИС, определяются стратегические цели использования информационных технологий, методы и способы достижения поставленных для них задач.

Макропроектирование (внешняя стадия, стадия предпроектирования) в научной и учебной литерату-

ре [10-13] относят к особой стадии проектирования сложной ИС и определяют ее как ключевую стадию создания модели системы, на которой выявляют функционально-структурные свойства системы, задают ключевые показатели ее функционирования и формируют требования к метамодели эффективности. Именно на этой стадии происходит создание обобщенной модели сложной системы, позволяющей ИТ-специалисту и управленцу получить ответы на вопросы об эффективности использования различных ИТ-стратегий при управлении развитием сложной организационно-технической системы в условиях изменяющейся внешней среды.

Вопросам разработки и реализации различных управленческих стратегий и оценки их эффективности посвящены работы таких известных авторов, как И. Ансофф [14], М. Мескон [15], С. Вутон и Т. Хорн [16], А. Томпсон и Д. Стрикланд [17], О. Виханский [18], Г. Минцберг [19] и ряд других. Рассматривая основные положения указанных исследований следует отметить, что наиболее важным в управлении любой сложной системы является наличие стратегии управления ее развитием и рассматриваемые в данном исследовании ГИСУ не являются исключением.

Государственная информационная система управления (ГИСУ) – тип больших экономических ИС; класс корпоративных ИС управления, включающих много-сортные множества взаимосвязанных и взаимодействующих в пространстве и во времени сложных элементов, формирующие интегративные свойства и функционирующие совместно для достижения целей, поставленных перед системой [20].

Цель статьи – сформировать и описать базовый методологический аппарат, обеспечивающий процесс стратегического управления крупномасштабной ГИСУ, под которым следует подразумевать совокупность последовательных действий, направленных на достижение поставленных государством перед информационными технологиями приоритетных целей, а также позволяющих оптимально использовать направляемые на развитие информационной системы бюджетные ресурсы в условиях неопределенности внешней среды.

Материалы и результаты исследования. Объектам класса ГИСУ характерна высокая сложность структуры и алгоритмов поведения и многопараметричность управления, что, естественно, приводит, во-первых, к сложности их моделей управления, а, во-вторых, требует при их разработке построения иерархических модульных конструкций и использования описания внутрисистемных процессов [13], а также описания сложных процессов управления.

Управление ГИСУ – это сложный механизм, направленный на оптимальное взаимодействие информационных технологий, функциональных подсистем и связанных с ними специалистов. К основным характеристиками управления ГИСУ, как крупномасштабными системами, А.В. Титов и И.А. Титов относят главную цель управления, качество достижения этой

цели и качество управления, сложность системы и технологии управления, а также ее описания [21].

Следует отметить, что начиная с некоторого значения масштаба управление ГИСУ выходит за рамки понятий управления отдельных хозяйствующих субъектов, корпораций или холдингов. Таким образом простая экстраполяция приемов создания функциональных информационных систем малого масштаба на системы крупного (общегосударственного) масштаба оказывается некорректной. Д.В. Реут справедливо отметил в своем диссертационном исследовании, посвященном теоретико-методологическим проблемам управления крупномасштабными системами, что «пренебрежение различиями в масштабе может привести к абсурдным рекомендациям» [22]. Следовательно, при создании моделей сложных ГИСУ и модели управления их развитием следует учитывать их масштаб.

Очевидно, что повсеместное экспериментирование проверяет альтернативные варианты архитектуры крупномасштабной организационно-технической системы в условиях реальной практики, однако полноценный прямой эксперимент на общегосударственном масштабе невозможен в связи с особой сложностью реального мира, так как требует значительного объема финансовых, кадровых ресурсов и времени. В любой крупномасштабной ГИСУ фактическое число переменных, влияющих на конкретную функциональную область, значительно превосходит интеллектуальные возможности любого управленца, принимающего решения, что, естественно, не позволяет ему выбрать точную ориентацию развития системы в будущем. Единственным систематизированным способом видения модели новой информационной системы и последствий альтернативных решений – является моделирование. Упростив реальный мир функционирования ГИСУ с помощью моделирования, можно успешно наблюдать за явлениями, которые могут наступить или не наступить в результате принятия различных стратегических и тактических решений.

Из всего вышеизложенного следует, что выбор подходов к стилю проектирования сложной (крупно-

масштабной) ГИСУ зависит не только от выбора методов моделирования и выбора формы образа моделируемого объекта (обобщенной модели системы), но и от выбора модели процесса стратегического развития системы.

Между тем, при стратегическом управлении развитием системы наиболее важным является четкое понимание основных общеметодологических понятий, к которым следует отнести следующие определения:

– *Методология стратегического управления* (МСУ) ГИСУ (в узком смысле) – это совокупность базовых теоретических принципов и методов, используемых в процессе управления развитием ГИСУ. В широкой трактовке МСУ ГИСУ следует определять как органическое единство системы методов моделирования и методов экспертной оценки, специфических методологических принципов, этапов процесса стратегического управления развитием ГИСУ и системы показателей, используемых в процессе оценки эффективности ГИСУ (рис.1).

– *Моделирование* ГИСУ базируется на принципах аналогии, т.е. возможности изучения реальной информационной системы управления не непосредственно, а опосредованно, через рассмотрение подобной ему и более доступной модели системы.

– *Целью* моделирования является повышение эффективности функционирования ГИСУ, как организационно-технической системы управления.

– *Модель* ГИСУ – это образ реальной информационной системы в сфере государственного управления, который отражает существенные свойства реального объекта и замещает его в ходе исследования и проектирования.

– *Процесс стратегического управления* включает постановку целей, выработку стратегии, определение необходимых ресурсов и поддержание взаимоотношений с внешней средой, которые позволяют менеджменту добиваться поставленных перед ними и системой целей и задач.

Модель процесса стратегического управления развитием сложной ГИСУ схематически отображена на рисунке 2.



Рисунок 1 – Единство стратегии, методологии и экспертирования

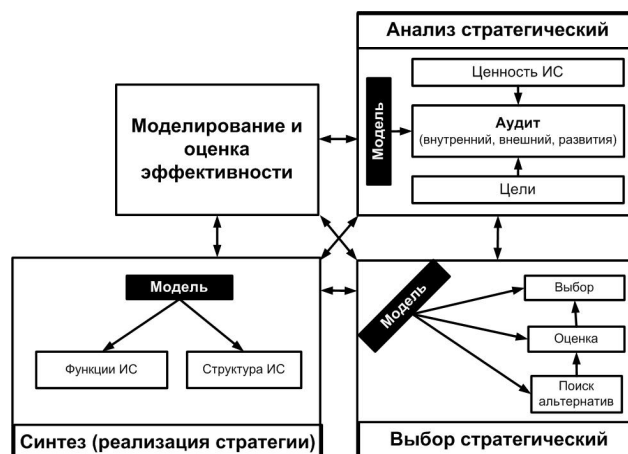


Рисунок 2 – Модель процесса стратегического управления развитием сложной ГИСУ.

Таким образом, на основе предложенных описаний и графических схем можно сформировать ряд базовых методологических принципов процесса стратегического управления развитием ГИСУ:

1. Принцип последовательности. Стратегическое управление развитием ГИСУ должно включать ряд последовательных и взаимосвязанных этапов моделирования и проектирования, каждый из которых должен использовать в качестве основы для принятия решений результаты предыдущего, при этом заключительный этап оценки функционирования информационной системы должен стать корректирующим для начальных этапов стратегического планирования.

2. Принцип системности. Принимаемые стратегические решения должны отражать системный характер, т.е. являться результатом анализа и синтеза:

- при анализе следует изучать объект, как сложную систему, строить модель воздействий на нее внешней среды, определять критерии оценки эффективности, имеющиеся ресурсы, необходимые ограничения; конечная цель стадии анализа – построение модели объекта (проектируемой системы) для оценки его характеристик;

- при синтезе на этапе внешнего проектирования следует решать задачи выбора стратегии управления развитием на основе модели объекта моделирования [13].

3. Принцип восхождения и баланса абстракций. Методология стратегического управления развитием ГИСУ должна обеспечивать движение от более абстрактных моделей описания ИС к более реальным моделям ИС с конкретными числовыми параметрами ее функционирования и критериям их оценки.

4. Принцип формализации. Для расширения области оценки и повышения доверия к вырабатываемым управленческим решениям в процессах моделирования и на этапах проектирования системы необходимо применять формальные методики, использующие математический аппарат и ориентированные на обработку различной (структурированной и неструктурированной) информации о параметрах функционирования ГИСУ, в том числе информации, содержащей неопределенность.

5. Принцип приемлемости решений. Стремление к оптимальности, т.е. к выбору такого управленческого решения $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, где x_j ($j = 1, 2, \dots, n$) – его компоненты, которое бы наилучшим образом учитывало бы внутренние возможности и внешние условия функционирования ГИСУ приводит к невозможности ее достижения в силу наличия множества противоречивых целей. Поэтому в данном случае под «оптимизацией» следует подразумевать обеспечение рациональности, или другими словами, приемлемости решений [23].

Очевидно, что этот список не ограничивается указанными принципами и может быть дополнен другими – сформированными под другим углом зрения и, возможно, не менее существенными и способными оказать влияние на формирование процесса стратегического управления развитием ГИСУ.

Таким образом, предложенные описания основных общеметодологических определений стратегического управления развитием ГИСУ в целом относятся к базовой части предметной области методологического знания о моделировании сложных информационных систем в сфере государственного управления. Факторы новизны предлагаемых подходов к решению обозначенной проблемы неразвитости методологии макропроектирования заключаются в использовании терминологических описаний и схематических отображений с целью формирования области знаний о стратегическом управлении сложной ГИСУ. Последовательное развитие этого знания позволит сформировать основу для создания нормативной методологии, как набора предписаний и норм, соблюдение которых как раз и необходимо для обеспечения рациональности и целенаправленности в процессах управления сложной информационной системой в сфере госуправления, которых в настоящее время так не хватает в нашей стране.

Заключение. Неразвитость методологического знания о макропроектировании сложных информационных систем не может пока обеспечить смысловой целостностью и принципиальной логикой весь процесс стратегического управления ГИСУ. Возможно поэтому при наличии значительного количества

отраслевой нормативно-правовой и методической документации, обеспечивающей различные фазы жизненного цикла информационных систем, Единой (государственной) технической политики пока не разработано. Отсутствие общих принципов и требований, предъявляемых к процессу управления ГИСУ, порождает коллективную безответственность, т.к. совершенно не ясно, как на этапах макропроектирования распределены роли, кто за что отвечает и, что самое важное – пока не обозначен «государственный контролер», который смог бы квалифицированно осуществлять независимый аудит функционирования ГИСУ, а также авторитетно проводить экспертную оценку ее перспективной модели.

Исходя из таких заключений и полученных результатов данного исследования можно предположить, что разработанный понятийный и методологический аппарат при определенных условиях сможет оказать влияние на формирование практических знаний о процессе стратегического выбора путей развития ГИСУ, который пока характеризуется повышенной степенью неопределенности и рисков при нарастании турбулентности, порождаемой цифровой трансформацией экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Наука, Физматлит, 1997. – 320 с.
2. Питухин Е.А. Математическое моделирование организационно-технических систем верхнего уровня: дис. ... д.т.н.: 05.13.18 / Петрозавод. гос. ун-т. / Питухин Евгений Александрович. Петрозаводск, 2006. – 348 с.
3. Стенограмма заседания Совета по стратегическому развитию и приоритетным проектам при Президенте России. URL: <https://ach.gov.ru/news/tatyana-golikova-federalnyj-byudzhet-sposoben-podderzhat-prioritetnye-napravleniya-gosrashodov-27409> (дата обращения: 22.06.2021).
4. Ерженин Р.В. Оценка результатов реализации проекта по созданию ГИИС «Электронный бюджет» // Инновации и инвестиции, 2019. – №6. – С. 107–113.
5. Ерженин Р.В. Управление бюджетными инвестициями на информатизацию государственных органов // Вестник АККОР, 2017. – № 2(42). – С. 98–102.
6. Манов А.Ф. Внедрение информационных технологий в деятельность контрольно-счетных органов: особенности и проблемы / Манов А.Ф., Князев К.А. // Вестник АККОР, 2016. – №2. – С. 203–207.
7. Бондаренко Ю.В. Процессный подход к цифровой трансформации органов прокуратуры / Ю.В. Бондаренко, И.В. Горюшко // Теория активных систем - 50 лет: материалы международной научно-практической конференции, Москва, 18–19 ноября 2019 года. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 323–327.
8. Валов С.В. Информационные технологии управления органами предварительного следствия / Теория активных систем - 50 лет: материалы международной научно-практической конференции, Москва, 18–19 ноября 2019 года. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 537–547.
9. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/41d4b737638b91da2184.pdf> (дата обращения: 22.06.2021).
10. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. М.: Советское радио, 1973. – 438 с.
11. Денисов А.А. Теория больших систем управления: учеб. пос. для вузов / А.А. Денисов, Д.Н. Колесников Л.: Энергоиздат. 1982. – 288 с.
12. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
13. Советов Б.Я. Моделирование систем: учеб. для вузов. 3-е изд. / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев // М.: Высш.шк., 2001. –

343 с.

14. Ансофф И. Стратегический менеджмент: классическое издание / Игорь Ансофф ; [пер. с англ. О. Литун]. - Москва [и др.] : Питер, 2009. – 342 с.
15. Мескон М. Основы менеджмента: Майкл Х. Мескон, Майкл Альберт, Франклин Хедоури; [пер. с англ. и ред. О. И. Медведь]. - 3-е изд. Москва [и др.]: Вильямс, 2016. – 665 с.
16. Wootton S., Home T., Strategic Planning. The nine step programme. Putting Theory into Practice A Step-by-Step Approach. Kogan Page, – 1997.
17. Томсон А., Стрикланд Д. Стратегический менеджмент. М.: ЮНИТИ, 1998. – 576 с.
18. Виханский О.С. Стратегическое управление. М.: Гардарики, 1998. – 296 с.
19. Минцберг Г., Альстрэнд Б., Лэмпел Д. Школы стратегий: стратег. сафари: экскурсия по дебрям стратегий менеджмента. СПб.: Питер, 2000. – 330 с.
20. Швецов А.Н. Модели и методы построения корпоративных интеллектуальных систем поддержки принятия решений: дис. ... д. т. н.: 05.13.01 / Швецов Анатолий Николаевич. Санкт-Петербург, 2004. – 461 с.
21. Титов А.В. Ситуационный подход к управлению развитием крупномасштабных систем / Титов А.В., Титов И.А. // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2008): Материалы 2 международной конференции, Москва. – 2008. – Т. 1. – С.118-120.
22. Реут Д.В. Управление крупномасштабными системами. Теоретико-методологические проблемы: дис. ... д.э.н.: 08.00.05. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана / Реут Дмитрий Васильевич. Москва, 2013. – 291 с.
23. Козлов В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятия решений: учебное пособие. Москва: Проспект, 2010. – 176 с.

Статья поступила в редакцию 14.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 004.8

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0012

МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ

© 2021

Маркин Евгений Игоревич, аспирант кафедры «Программирование»
Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mails: evgeniymarkin1@gmail.com)

Аннотация. Обработка изображений, предваряющая их анализ с помощью алгоритма идентификации личности, является одним из ответственных этапов, определяющих точность распознавания человека. В настоящее время не существует единого метода решения этой задачи ввиду сильно различающихся внешних условий работы систем (разное освещение, качество камер, расстояние до объектов и т.д.). Поэтому одним из ключевых направлений разработки систем идентификаций являются исследования в области предварительной обработки изображений. Классический подход подразумевает использование фильтров для нормализации контрастности и резкости изображений не всегда эффективен, поскольку при его применении могут теряться детали изображения лица. В статье приводится сравнительный анализ ряда современных методов повышения качества изображений, которые способны исключить потерю деталей.

Ключевые слова: нейронная сеть, сверточные нейронные сети, генеративно-сопоставительные сети, обработка фото-изображений, цифровая фотография.

IMAGE PREPROCESSING METHODS IN PERSONAL IDENTIFICATION SYSTEMS

© 2021

Markin Evgeniy Igorevich, postgraduate of sub-department «Programming»
Penza state technological university

(440039, Russia, Penza, Baydukov Proezd / Gagarin Street, 1a/11, e-mails: evgeniymarkin1@gmail.com)

Abstract. Image processing, which precedes their analysis by means of an identification algorithm, is one of the crucial steps determining the accuracy of human recognition. Currently, there is no single method for solving this problem due to widely differing external conditions of the systems (different lighting, camera quality, distance to objects, etc.). Therefore, one of the key areas in the development of identification systems is research in the field of image preprocessing. The classic approach involves the use of filters to normalize contrast and sharpness of images is not always effective, because it can lose details of the face image. This article provides a comparative analysis of a number of modern methods to improve image quality, which can eliminate the loss of detail.

Keywords: neural networks, convolutional neural networks, generative-adversarial networks, photo-image processing, digital photography.

Введение. Алгоритмы и методы распознавания лиц и идентификации личности за последние годы достигли высоких показателей благодаря развитию методов искусственного интеллекта, разработке процессоров для нейронных вычислений и росту заинтересованности компаний в данной области. Существующие технологии позволяют в режиме реального времени проводить одновременно довольно точное распознавание десятков лиц [1]. Но достижение такого уровня показателей возможно только при соблюдении ряда идеальных условий, таких как высокое разрешение фотографии, высокая четкость и контрастность снимка, равномерная освещенность, определенный угол наклона головы и т.д. [2]. Выполнение всех этих условий крайне затруднительно в реальном режиме работы оборудования, поэтому сейчас активно изучаются и испытываются различные методы для снижения воздействия внешних факторов на работу системы.

Целью настоящей работы является обзор и анализ методов предварительной обработки изображений для улучшения их качества и повышения точности идентификации личности.

Материалы и результаты исследования. Одной

из основных проблем распознавания лиц является качество изображений – недостаточное разрешение камеры, искажения оптических линз, перемещение объекта во время съемки ухудшают изображение, становится сложно извлечь полезную информацию. При этом системы распознавания и идентификации могут давать ложные сигналы или некорректные данные [3]. Традиционно для решения проблемы используется следующий комплекс методов [4]:

– для устранения размытия используется трекинг лица с поиском наилучшего кадра для распознавания;

– для извлечения максимальной информации из изображения проводится оценка его контрастности и ее усреднение с целью нормализации;

– для получения дополнительных деталей проводится оценка и увеличение резкости до заданных пороговых значений.

Данный подход характеризуется высоким быстродействием, но в процессе поиска наиболее «качественного кадра» могут теряться информативные кадры и увеличиваться время идентификации личности, что, в случаях, когда лицо попадает в кадр на несколько секунд, может стать критичным. Также из-за усреднения контрастности и повышения резкости одного

кадра могут проявляться артефакты, приводящие к ложным срабатываниям системы распознавания.

В качестве альтернативного метода для повышения качества изображений часто применяют метод «*Super Resolution*», данный подход основан на применении нейронных сетей.

На сегодняшний день в рамках указанного метода реализуются четыре основных подхода к улучшению изображения:

- *prediction models* (предсказательные модели) [5];
- *edge based methods* (краевые методы) [6];
- *image statistical methods* (статистические методы) [7];
- *patch based (or example-based) methods* (методы основанные на паттернах) [8].

Наилучшее качество дает модель *patch based (or example-based) methods* (методы основанные на паттернах).

Впервые использование сверточной нейронной сети, работающей по принципу *end to end*, для повышения резкости изображений было предложено Chao Dong в работе «*Image Super-Resolution Using Deep Convolutional Networks*» [9]. Предложенный подход состоит из трех основных функций (рис. 1):

- 1) извлечения и отображения патчей;
- 2) нелинейного отображения;
- 3) реконструкции.

Данный подход позволяет значительно улучшить качество изображения в сравнении с методами применения фильтров, при этом сохраняется высокая скорость работы (рис. 2).

В работе «*Photo-Realistic Single Image Super-Resolution Using a Generative Adversarial Network*» Christian Ledig [10] предлагает решение задачи улучшения фотографии путем применения генеративно-сопоставительной сети (*GAN*) [11-13] (рис. 3).

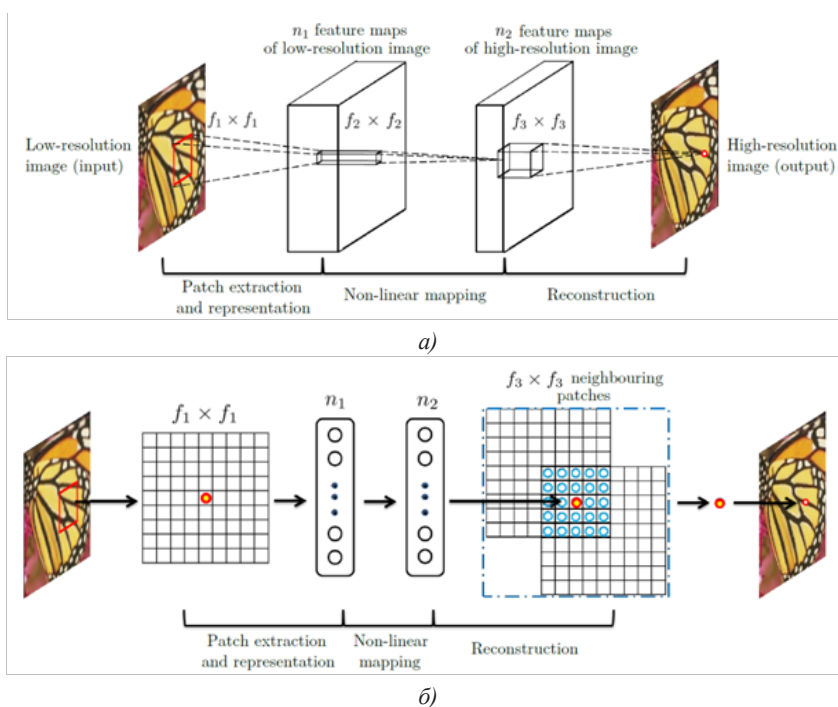


Рисунок 1 – Схема работы нейронной сети по методу разреженного кодирования (*Super-Resolution Convolutional Neural Network, SRCNN*)

а) двухслойная нейронная сеть, верхний уровень которой извлекает набор карт признаков, а второй слой нелинейно сопоставляет эти карты признаков с представлениями участков высокого разрешения; б) метод на основе разреженно-го кодирования в представлении сверточной нейронной сети



Рисунок 2 – Сравнение работы метода SRCNN с оригинальным изображением, бикубическим методом увеличения качества (*Bicubic*) и разреженным кодированием (*sparse-coding, SC*)

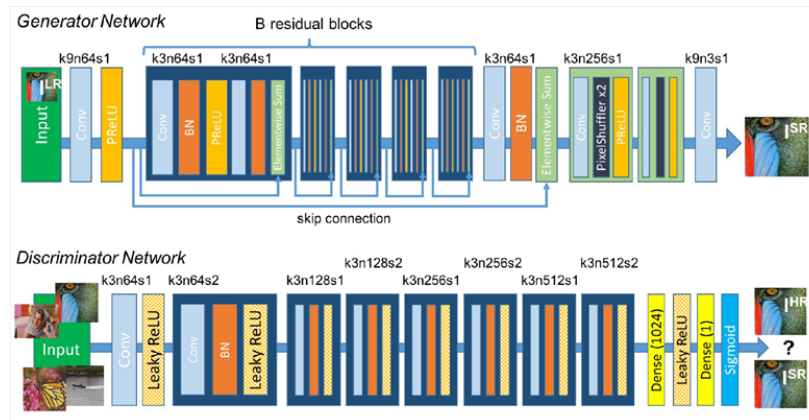


Рисунок 3 – Архитектура сети генератора и дискриминатора с соответствующим размером ядра (k), количеством карт признаков (n) и шагом (s) для каждого сверточного слоя

Задача генеративно-сопоставительной сети заключается в обучении генеративной функции, которая для входного изображения низкого качества сравнивает его с соответствующим высококачественным аналогом. Для этого обучается *GAN* как сверточная нейронная сеть (*convolutional neural network, CNN*) [14] прямого распространения с оптимизацией, специфичной для реконструирования изображения с высоким качеством функции потерь восприятия.

Дискриминаторная сеть (*Discriminator Network, дискриминатор*) [15 – 16] последовательно оптимизируется вместе с генеративной сетью (генератором) для решения сопоставительной проблемы *min-max*. Общая идея заключается в том, чтобы обучить генеративную модель «обманывать» дискриминатор, который обучен отличать высококачественные изображения от реальных. С помощью такого подхода генератор может научиться создавать решения, очень похожие на реальные изображения, и, следовательно, трудно классифицируемые дискриминатором. Использование *GAN* позволяет повысить качество текстуры изображения, результаты отличаются более высокой фотореалистичностью в сравнении с другими методами (рис. 4). Заметим, что метод «*Super Resolution*» эффективен только при работе с кадрами, где объект неподвижен и имеет четкие контуры, что в реальных системах видеонаблюдения в режиме реального времени является затруднительным.

В большинстве подходов для подготовки изображения перед его распознаванием происходит поиск оптимального кадра, а соседние кадры полагаются

идентичными, ввиду чего пропускаются.

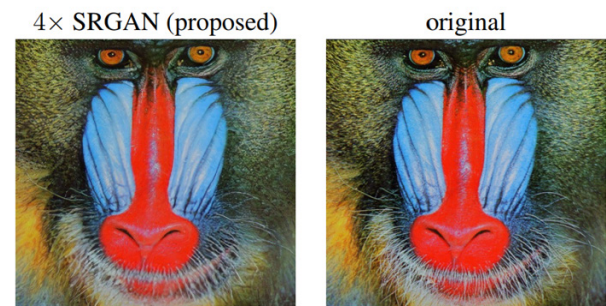


Рисунок 4 – Сравнение изображения, восстановленного с применением *GAN*, с оригиналом

Однако Sam Hasinoff в своей работе «*Burst photography for high dynamic range and low-light imaging on mobile cameras*» [17] доказал, что использование соседних идентичных кадров позволяет значительно повысить качество изображений (рис. 5). В соответствии с данным подходом во избежание клиппинга (потери информации на светлых участках кадра) используются фотографии с достаточно низкой экспозицией [18], что дает дополнительные возможности для расширения динамического диапазона [19]. Помимо этого фотографии делаются с уменьшенной выдержкой, чтобы устранить размытие движущихся объектов [20]. Данные действия дают возможность получить дополнительную информацию для расширения динамического диапазона, однако увеличивают уровень шума, для компенсации которого необходимо объединение серии кадров (рис. 6).

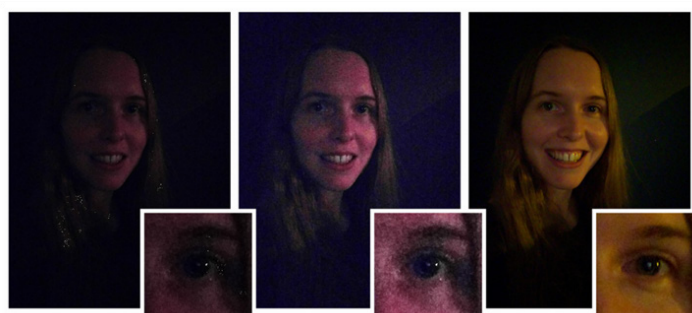


Рисунок 5 – Слева и по центру обычные фотографии, справа результат объединения соседних кадров

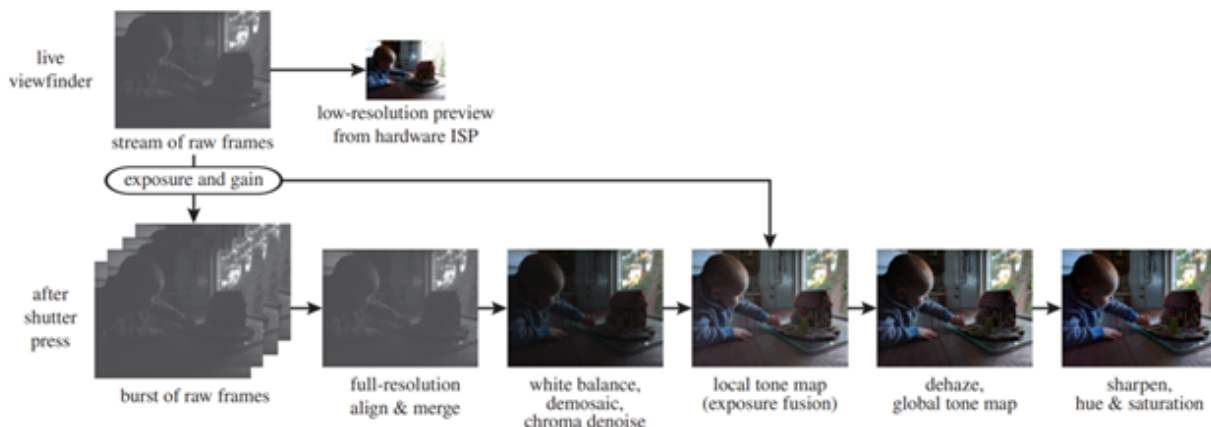


Рисунок 6 – Схема работы нейронной сети для объединения соседних кадров

При объединении нескольких соседних кадров получается промежуточное изображение с повышенной битовой глубиной, большим динамическим диапазоном и меньшим уровнем шума по сравнению с исходными кадрами. Данный подход позволяет получить высококачественное изображение с повышенными контрастностью и резкостью, а также устранить небольшие размытия. Все это дает дополнительную полезную информацию для идентификации личности, но требует более длительного времени порядка 1-2 секунд для объединения соседних кадров.

Заключение. Описаны основные методы для предварительной обработки изображений с целью повышения их качества, и как следствие, повышения достоверности идентификации личности. Показано, что наиболее эффективным по быстродействию и качеству получаемых изображений является метод «*Super Resolution*», но данный метод применим только к неподвижным объектам.

Подход Sam Hasinoff демонстрирует достаточно высокое качество изображений даже в случаях небольшого размытия перемещающегося объекта, но сопряжен со значительными затратами времени из-за сложности процесса объединения кадров, в связи с чем требует оптимизации для сценария идентификации личности. В то же время этот способ следует признать перспективным, если дополнить его процедурами предварительного извлечения изображений лиц из ряда соседних кадров с дальнейшим объединением информации о них, что позволит значительно сократить время объединения соседних кадров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Максименко, В. Н. Анализ системы распознавания лиц по алгоритму нейронной сети / В. Н. Максименко, Т. С. Волошина // Экономика и качество систем связи. – 2018. – № 4(10). – С. 31-37.
2. Юрко, И. В. Исследование основных проблем, связанных с распознаванием и идентификацией лиц по видеофиксации и совершенствование работы алгоритмов распознавания лиц по видеофиксации в режиме реального времени / И. В. Юрко, В. Н. Алдобаева // Проблемы современной науки и образования. – 2018. – № 6(126). – С. 36-42.
3. Трофименко, Я. М. Алгоритмы предобработки изображений в системе идентификации лиц в видеопотоке / Я. М. Трофименко, Л. Н. Виноградова, Е. В. Ершов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2019. – № 4(91).

- С. 21-29. – DOI 10.23859/1994-0637-2019-4-91-2.
4. Небаба, С. Г. Методы оценки и подготовки изображений в видеопотоке к распознаванию объектов / С. Г. Небаба // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению "Графикон". – 2018. – № 28. – С. 450-453.
5. Onishi R., Sugiyama D., Matsuda K. Super-resolution simulation for real-time prediction of urban micrometeorology // SOLA. – 2019.
6. Zhou Q. et al. Edge-preserving single image super-resolution // Proceedings of the 19th ACM international conference on Multimedia. – 2011. – С. 1037-1040.
7. Goyal P., Gupta S. C. Statistical method for image registration & enhancement through super-resolution.
8. Rasti P. et al. A new low-complexity patch-based image super-resolution // IET Computer Vision. – 2017. – Т. 11. – №. 7. – С. 567-576.
9. Dong C. et al. Image super-resolution using deep convolutional networks // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2015. – Т. 38. – №. 2. – С. 295-307.
10. Ledig C. et al. Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2017. – С. 4681-4690.
11. Zhang W. et al. RankSRGAN: Super Resolution Generative Adversarial Networks with Learning to Rank // arXiv preprint arXiv:2107.09427. – 2021.
12. Guo Y. et al. Super-Resolution Image Reconstruction Based on Self-Calibrated Convolutional GAN // arXiv preprint arXiv:2106.05545. – 2021.
13. Goodfellow I. et al. Generative adversarial networks // Communications of the ACM. – 2020. – Т. 63. – №. 11. – С. 139-144.
14. O'Shea K., Nash R. An introduction to convolutional neural networks // arXiv preprint arXiv:1511.08458. – 2015.
15. Wei J. et al. PeerGAN: Generative Adversarial Networks with a Competing Peer Discriminator // arXiv preprint arXiv:2101.07524. – 2021.
16. Choi J., Han B. MCL-GAN: Generative Adversarial Networks with Multiple Specialized Discriminators // arXiv preprint arXiv:2107.07260. – 2021.
17. Hasinoff S. W. et al. Burst photography for high dynamic range and low-light imaging on mobile cameras // ACM Transactions on Graphics (ToG). – 2016. – Т. 35. – №. 6. – С. 1-12.
18. Gharbi M. et al. Deep bilateral learning for real-time image enhancement // ACM Transactions on Graphics (TOG). – 2017. – Т. 36. – №. 4. – С. 1-12.
19. Wei K. et al. A physics-based noise formation model for extreme low-light raw denoising // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2020. – С. 2758-2767.
20. Dahary O., Jacoby M., Bronstein A. M. Digital Gimbal: End-to-end Deep Image Stabilization with Learnable Exposure Times // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2021. – С. 11936-11945.

Статья поступила в редакцию 10.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 519.6

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0013

**АЛГЕБРАИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
В ПОРАХ ПРОТОЧНОГО ТРЕХМЕРНОГО ЭЛЕКТРОДА ИЗ УГЛЕГРАФИТОВОГО
ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА**

© 2021

Кузина Валентина Владимировна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-вычислительные системы»

Гвоздева Ирина Геннадьевна, старший преподаватель кафедры
«Информационно-вычислительные системы»

Кошев Александр Николаевич, доктор химических наук,
профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы»
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28,
e-mails: kuzina@pguas.ru, gvozd_69@mail.ru, koshev@pguas.ru)

Варенцов Валерий Константинович, доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник лаборатории гетерогенных систем
Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН
(630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18, e-mail: vvk@ngs.ru)

Аннотация. Для исследования свойств электрохимических процессов, протекающих в объеме проточных трехмерных электродов с катодами из углеродных волоконистых материалов, в статье используются методы математического моделирования. Предложен вывод системы уравнений, позволяющей проводить анализ поведения электрохимических функций в зависимости от комплексов электрохимических и технологических параметров, а также вычислительные эксперименты для расчета распределения потенциала и концентрации электроактивного вещества по толщине электрода. Кроме того, представленные формулы целесообразно применять для расчета начальных и промежуточных значений потенциала, плотности тока и концентрации, необходимых для решения поставленных краевых задач методом «стрельбы», который обычно используется при решении двухточечных граничных задач для систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Цель исследования – разработка математической модели в виде системы алгебраических уравнений для теоретического анализа и оптимизации электрохимических параметров и режимов использования реакторов с проточными трехмерными электродами, а также для выявления наиболее удачных конструктивных параметров электролизера с катодами из углеродных волоконистых материалов. В результате исследования показано, что приведенные в статье математические модели, представляющие собой более простые уравнения и соотношения для выполнения расчетов, удовлетворяют принятым корректным допущениям и упрощениям.

Ключевые слова: математическое моделирование электрохимических процессов, проточные трехмерные электроды, углеродные волоконистые материалы, устойчивость и разрешимость моделирующих уравнений.

**ALGEBRAIC MODEL FOR CALCULATION OF THE ELECTROCHEMICAL PROCESS IN THE PORES
OF A THREE-DIMENSIONAL FLOW ELECTRODE FROM A CARBON FIBER MATERIAL**

© 2021

Kuzina Valentina Vladimirovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the department «Information and computing systems»

Gvozdeva Irina Gennadiyevna, senior lecturer of the department «Information and computing systems»

Koshev Alexander Nikolaevich, doctor of chemistry science,
professor of the department «Information and computing systems»

Penza State University of Architecture and Construction
(440028, Russia, Penza, German Titov St., 28, e-mails: kuzina@pguas.ru, gvozd_69@mail.ru, koshev@pguas.ru)

Varentsov Valery Konstantinovich, doctor of technical sciences, professor
Solid State Chemistry and Mechanochemistry of Siberian branch of Russian Academy of Science
(630128, Russia, Novosibirsk, st. Kutateladze, 18 E-mail: vvk@ngs.ru)

Abstract. To study the properties of electrochemical processes occurring in the volume of flowing three-dimensional electrodes with cathodes made of carbon-graphite fibrous materials, the article uses methods of mathematical modeling. The derivation of a system of equations is proposed, which makes it possible to analyze the behavior of electrochemical functions depending on the complexes of electrochemical and technological parameters, as well as computational experiments to calculate the distribution of the potential and concentration of an electroactive substance over the thickness of the electrode. In addition, it is advisable to apply the presented formulas to calculate the initial and intermediate values of the potential, current density and concentration required to solve the set boundary value problems by the “shooting” method, which is usually used to solve two-point boundary value problems for systems of ordinary differential equations. The aim of the study is to develop a mathematical model in the form of a system of algebraic equations for the theoretical

analysis and optimization of electrochemical parameters and modes of use of reactors with flowing three-dimensional electrodes, as well as to identify the most successful design parameters of electrolyzers with carbon fiber cathodes. As a result of the study, it is shown that the mathematical models presented in the article, which are simpler equations and ratios for performing calculations, satisfy the accepted correct assumptions and simplifications.

Keywords: mathematical modeling of electrochemical processes, flowing three-dimensional electrodes, carbon-graphite fibrous materials, stability and solvability of modeling equations.

Введение. Электрохимические процессы, протекающие в объеме проточных трехмерных электродов (ПТЭ) с катодами из углеродистых волоконистых материалов [1-7], несмотря на многочисленные исследования эффективности их использования для решения различных технологических задач [6-10], требуют дальнейшего изучения, которое позволило бы определять оптимальные условия их эксплуатации и наиболее удачные конструктивные параметры. Решение подобных задач стало особенно актуальным в связи с разработкой новых углеродистых материалов и возможностью электрохимического преобразования их свойств с целью получения оптимальных результатов использования реакторов с ПТЭ.

Цель исследования – разработка математической модели в виде системы алгебраических уравнений для теоретического анализа и оптимизации электрохимических параметров и режимов использования реакторов с проточными трехмерными электродами, а также для выявления наиболее удачных конструктивных параметров электролизеров с катодами из углеродных волоконистых материалов.

Описание процессов электроосаждения металлов на проточный трехмерный электрод представляет собой, в общем случае, распределенную систему дифференциальных и интегральных уравнений, расчеты по которым осложнены в силу имеющихся математических и вычислительных особенностей краевых задач [11-19].

Как для теории, так и для практики исследований процессов в ПТЭ, представляет интерес разработка таких математических моделей, которые, посредством корректных допущений и упрощений, представляют собой более простые уравнения и соотношения для проведения расчетов систем, удовлетворяющих принятым допущениям.

Материалы и результаты исследований. Обозначим электрохимические и технологические константы и переменные в соответствии с общепринятыми правилами [20]: $J_s(x)$ – общая плотность тока в точке электрода x , $0 \leq x \leq L$; L – толщина электрода; j_0 – плотность тока обмена; κ_T – электропроводность твердой фазы; $\kappa_{ж}$ – электропроводность жидкой фазы; $E(x)$ – потенциал в точке электрода с координатой x ; S_v – удельная реакционная поверхность; $C(x)$ – концентрация электроактивных частиц в точке x ; C_0 – концентрация электроактивных частиц в глубине раствора; v – скорость протока электролита; α, Z, F, R, T – электрохимические и физические параметры.

Распределение потенциала и плотности поляризующего тока описывается системой дифференциальных уравнений [14]:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = \frac{-\kappa'_T(x) \kappa_{ж}}{\kappa_T(x)(\kappa_T(x) + \kappa_{ж})} \frac{dE}{dx} + S_v \left(\frac{1}{\kappa_T(x)} + \frac{1}{\kappa_{ж}} \right) J_s(x); \quad (1)$$

$$J_s(x) = j_0 \frac{\exp(\alpha ZFE(x)/RT) - \exp((\alpha - 1)ZFE(x)/RT)}{1 + j_0 \exp(\alpha ZFE(x)/RT)/ZFK_m C(x)}; \quad (2)$$

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{S_v}{vZF} J_s(x); \quad (3)$$

$$\frac{dE}{dx}(0) = -\frac{J_{cp}}{\kappa_T(0)}; \quad \frac{dE}{dx}(L) = \frac{J_{cp}}{\kappa_{ж}}; \quad C(0) = C_0. \quad (4)$$

Ниже приводится вывод системы алгебраических уравнений, позволяющей в ряде случаев корректно рассчитывать распределение электрохимических функций по толщине ПТЭ.

Интегрирование моделирующей системы с помощью степенных рядов.

Введем обозначения комплексов электрохимических и технологических параметров:

$$K_1 = \frac{\kappa_T + \kappa_{ж}}{\kappa_{ж} \kappa_T} S_v j_0; \quad K_2 = \frac{\alpha ZF}{RT}; \quad K_3 = \frac{(1 - \alpha)ZF}{RT};$$

$$K_4 = j_0; \quad K_5 = ZFK_m; \quad K_6 = \frac{\kappa_T \kappa_{ж} K_m}{(\kappa_T + \kappa_{ж})v};$$

$$K_7 = \frac{S_v j_0}{vZF}; \quad K_8 = j_0 - \frac{K_6 K_m}{(\kappa_T + \kappa_{ж})v} + C_0 ZFK_m;$$

$$E_1 = -\frac{I}{\kappa_T}.$$

Тогда система дифференциальных уравнений, описывающая процесс электроосаждения металла на ПТЭ с учетом изменения его концентрации по толщине, запишется следующим компактным образом:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = K_1 \left(\frac{\exp(K_2 E) - \exp(-K_3)}{1 + K_4 \exp(K_2 E)/K_5 C(x)} \right);$$

$$\frac{dC}{dx} = K_7 \left(\frac{\exp(K_2 E) - \exp(K_3 E)}{1 + \exp(K_2 E)/(K_5 C(x))} \right).$$

Предположим, что функция $E(x)$ – близка к линейной в окрестности точки $x = 0$. Получим приближенные формулы, дающие решение системы, удовлетворяющее начальным условиям:

$$E(0) = E_0; \quad E'(0) = E_1; \quad C(0) = C_0 \quad (5)$$

Анализируя правые части равенства, замечаем, что

$$\frac{d^2 E}{dx^2} \text{ и } \frac{dC}{dx} \text{ связаны линейно: } \frac{d^2 E}{dx^2} = \frac{K_1 dC}{K_7 dx} \text{ или } \frac{d^2 E}{dx^2} = \frac{K dC}{dx}, \quad (6)$$

где $K = K_1/K_7 > 0$

Интегрируя обе части уравнения (6), получим:

$$\frac{dE}{dx} = KC(x) - \bar{C}, \quad (7)$$

где \bar{C} – произвольная постоянная.

Из равенства (7) следует, что если найдено $E(x)$, то всегда можно определить $C(x)$ по формуле:

$$C(x) = \frac{1}{K} \left(\frac{dE}{dx} - \bar{C} \right). \quad (8)$$

Этим выражением мы воспользуемся в дальнейшем.

Подставляя $C(x)$, записанное в виде (8), в первое уравнение, получаем нелинейное уравнение второго порядка относительно функции $E(x)$:

$$\frac{d^2 E(x)}{dx^2} = K_1 \cdot \frac{e^{K_2 E} - e^{-K_3 E}}{1 + K_4 \cdot \frac{K_5}{K} \cdot \left(\frac{dE}{dx} - \bar{C} \right)}. \quad (9)$$

Таким образом, от «связанной» системы мы перешли к «расщепленному» уравнению (9). Заметим, что подстановка $K_5/K = K_5$ упрощает вид уравнения (9):

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = K_1 \frac{K_6 \cdot \left(\frac{dE}{dx} - \bar{C} \right) \cdot (e^{K_2 E} - e^{-K_3 E})}{K_4 \cdot e^{K_2 E} + K_6 \cdot \left(\frac{dE}{dx} - \bar{C} \right)}. \quad (10)$$

Представляя экспоненты, фигурирующие в уравнении (10), в виде рядов и отбрасывая члены второго и более высоких порядков малости относительно E , получаем:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = \frac{K_1 K_6 \cdot \left(\frac{dE}{dx} - \bar{C} \right) \cdot (K_2 + K_3) E}{K_4 \cdot (1 + K_2 E) + K_6 \cdot \left(\frac{dE}{dx} - \bar{C} \right)} \quad (11)$$

или

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = K_9 \frac{(E' - \bar{C}) \cdot E}{K_8 + K_2 \cdot K_4 \cdot E + K_6 \cdot E'}, \quad (12)$$

где обозначено:

$$K_9 = K_1 \cdot K_6 \cdot (K_2 + K_3); \quad K_8 = K_4 - \bar{C} \cdot K_6.$$

Последнее уравнение можно приближенно проинтегрировать с помощью степенного ряда:

$$E = E_0 + E_1 x + E_2 x^2 + E_3 x^3 + E_4 x^4 + \dots \quad (13)$$

Очевидно,

$$E' = E_1 + 2E_2 x + 3E_3 x^2 + 4E_4 x^3 + \dots$$

$$E'' = 2E_2 + 6E_3 x + 12E_4 x^2 + \dots \quad (14)$$

В формулах (13), (14) E_0 и E_1 – начальные условия, фигурирующие в (5). Покажем, как можно определить E_2 и E_3 . Для этого представим (12) в форме:

$$(K_8 + K_2 \cdot K_4 \cdot E + K_6 \cdot E') \cdot E'' = K_9 \cdot (E' - \bar{C}) \cdot E.$$

Подставляя в последнее выражение E, E', E'' в виде (13), (14), получаем:

$$\begin{aligned} & [K_8 + K_2 K_4 \cdot (E_0 + E_1 x + E_2 x^2 + E_3 x^3 + \dots) + \\ & + K_6 (E_1 + 2E_2 x + 3E_3 x^2 + \dots)] \cdot (2E_2 x + 3E_3 x^2 + \dots) = \\ & = K_9 [(E_1 - \bar{C}) + 2E_2 x + 3E_3 x^2 + 4E_4 x^3 + \dots] \times \\ & \times (E_0 + E_1 x + E_2 x^2 + E_3 x^3). \end{aligned}$$

Приравниваем коэффициенты при отрицательных степенях слева и справа:

$$\begin{aligned} & (K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1) \cdot 2E_2 = K_9 (E_1 - \bar{C}) E_0; \\ & 12E_2 E_3 (K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_1 K_6) + \\ & + 2E_2 (E_1 K_2 K_4 E_0 + 2E_2 K_6) = K_9 (E_1 - \bar{C}) E_1 + 2K_9 v_0. \end{aligned} \quad (15)$$

Из равенства (15) находим E_2 :

$$E_2 = \frac{K_9 \cdot (E_1 - \bar{C}) \cdot E_0}{2 \cdot (K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1)}.$$

В частности, если $E_0 = 0$, то $E_2 = 0$. Если $E_2 \neq 0$, то из (15) можно определить E_3 :

$$E_3 = \frac{K_9 (E_1 - \bar{C}) + 2K_9 E_2 E_0 - 2E_2 (K_9 E_0 - E_1 K_2 K_4 - 2E_2 K_6)}{12 \cdot (K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_1 K_6)}.$$

Таким образом, в случае, если $E_n \neq 0$, получаем:

$$\begin{aligned} E(x) \approx & E_0 + E_1 x + \frac{K_9 E_0 (E_1 - \bar{C})}{2 \cdot (K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1)} \cdot x^2 + \\ & + \frac{K_9 (E_1 - \bar{C}) E_1 + 2E_2 (K_9 E_0 - K_2 K_4 E_1 - 2K_6 E_2)}{12 E_2 (K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_1 K_6)} x^3. \end{aligned}$$

Тогда $E'(x)$ находится по формуле:

$$\begin{aligned} E'(x) = & E_1 + \frac{K_9 E_0 (E_1 - \bar{C})}{(K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1)} x + \\ & + \frac{K_9 (E_1 - \bar{C}) E_1 + 2E_2 (K_9 E_0 - K_2 K_4 E_1 - 2K_6 E_2)}{4 E_2 (K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_1 K_6)} x^2. \end{aligned} \quad (16)$$

С помощью соотношения (8) определим $C(x)$:

$$C(x) \approx \frac{1}{K} \left[\begin{aligned} & E_1 - \bar{C} + \frac{K_9 E_0 (E_1 - \bar{C})}{2(K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1)} x + \\ & \frac{K_9 (E_1 - \bar{C}) E_1 + 2E_2 (K_9 E_0 - K_2 K_4 E_1 - 2K_6 E_2)}{4E_2 (K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_1 K_6)} x^2 \end{aligned} \right]. \quad (17)$$

Оставляя члены 2-го порядка малости в формулах (16), (17), получим искомые приближенные формулы $E_2 \neq 0$:

$$\begin{aligned} E(x) \approx & E_0 + E_1 x + \frac{K_9 E_0 (E_1 - \bar{C})}{2 \cdot (K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1)} \cdot x^2; \\ C(x) \approx & \frac{K_9}{K_1} \left[\begin{aligned} & E_1 - \bar{C} + \frac{K_9 E_0 (E_1 - \bar{C})}{K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1} x + \\ & \frac{K_9 (E_1 - \bar{C}) E_1 + 2E_2 (K_9 E_0 - K_2 K_4 E_1 - 2K_6 E_2)}{4E_2 (K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_1 K_6)} x^2 \end{aligned} \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Поскольку $C(0) = C_0$, из последней формулы определим \bar{C}

$$C_0 = \frac{K_9}{K_1} (E_1 - \bar{C}), \quad (19)$$

откуда $\bar{C} = E_1 - C_0 K_1 / K_9$.

Подставляя в формулу (18) это значение \bar{C} получим:

$$\begin{aligned} E(x) \approx & E_0 + E_1 x + \frac{C_0 K_1 E_0}{2 \cdot (K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1)} \cdot x^2; \\ C(x) \approx & \frac{K_9}{K_1} \cdot \left[\begin{aligned} & E_1 - \bar{C} + \frac{K_9 E_0 (E_1 - \bar{C})}{K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1} x + \\ & \frac{C_0 K_1 E_1 + 2E_2 (K_9 E_0 - K_2 K_4 E_1 - 2K_6 E_2)}{4E_2 (K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_1 K_6)} x^2 \end{aligned} \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

Заключение. Уравнения системы (20) можно использовать как для анализа поведения электрохимических функций, в зависимости от комплексов электрохимических и технологических параметров, так и для вычислительных экспериментов при проведении расчетов распределения потенциала и концентрации электроактивного вещества по толщине электрода. Кроме того, формулы (20) целесообразно применять для расчета начальных и промежуточных значений потенциала, плотности тока и концентрации, необходимых для решения краевых задач (1) – (4) методом «стрельбы», обычно используемом при решении двухточечных граничных задач для систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Формулы (19), (20) дают возможность оценивать равномерность распределения электрохимического процесса по толщине ПТЭ и корректировать параметры процесса и электрода, обеспечивающие наилучшую равномерность в заданных условиях. При этом нужно понимать, что и результаты вычислений, и анализ моделирующих уравнений носят приближенный характер, требующий либо экспериментального подтверждения, либо проверочных расчетов по уравнению

ям более обобщенных моделей процессов в ПТЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Варенцов, В.К. Современные проблемы электролиза и задачи оптимизации процессов в реакторах с трехмерными углеродными электродами: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 286 с.
2. Варенцов, В.К. Современные проблемы технической электрохимии. Ч. III. Электрохимические реакторы и процессы с проточными углеродными электродами / В.К. Варенцов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 124 с.
3. Окислительно-восстановительные процессы на проточных трехмерных электродах. Математическое моделирование. Теория. Эксперимент: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2020. – 172 с.
4. Варенцов, В.К. Современные проблемы технической электрохимии. Ч. II. Электролиз с проточными углеродными электродами в гальванотехнике / В.К. Варенцов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 105 с.
5. Варенцов, В.К. Электролиз с трехмерными электродами в процессах регенерации металлов из промывных растворов гальванических производств / В.К. Варенцов // Изв. СО АН СССР, Сер. хим. наук, 1988, № 9/3. – С. 124-138.
6. Углеродные волокнистые электроды: свойства, модификация, процессы и электролизеры. Математическое моделирование и оптимизация: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2021. – 176 с.
7. Ковалёва, О.В. Интенсификация электрохимических процессов регенерации быстроокисляющихся электролитов железнения / О.В. Ковалёва, В.М. Шайдулин, В.К. Варенцов // Малоотходные и ресурсосберегающие процессы в гальванотехнике: материалы семинара. – М.: ИДНТП, 1988. – С. 55-58.
8. Варенцов, В.К. Переработка растворов золота в царской водке электролизом на углеродных волокнистых катодах / В.К. Варенцов, В.И. Варенцова // Цветные металлы, 2000, № 5. – С. 69-72.
9. Варенцов, В.К. Применение электрохимических процессов и реакторов с трехмерными электродами для решения экологических проблем гальванотехники / В.К. Варенцов // Журнал экологической химии, 1993, № 4. – С. 335-341.
10. Варенцов, В.К. Регенерация благородных металлов из солянокислых растворов аффинажа золота электролизом с УВЭ / В.К. Варенцов, В.И. Варенцова // Химия в интересах устойчивого развития, 1997, № 3. – С. 265-272.
11. Даниель-Бек, В.С. К вопросу о поляризации пористых электродов / В.С. Даниель-Бек // Журнал физической химии, 1948, Т. 22. – С. 697-710.
12. Гуревич, Н.Г. Работа жидкостных пористых электродов в режиме вынужденной подачи реагентов / Н.Г. Гуревич, В.С. Баготский // Инженерно-физический журнал, 1963, Т.6, №2. – С. 75-86.
13. An improved model of potential and current distribution within a flow-through porous electrode / T. Doherty, J.G. Sunderland, P.L. Roberts, D.J. Pickett // Electrochem. Acta, 1996, T. 41, №4. – P. 519-526.
14. Кошев, А.Н. Разработка и исследование математических моделей нестационарных процессов в электрохимических реакторах с проточными трехмерными электродами: моногр. / А.Н. Кошев, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 119 с.
15. Гвоздева, И.Г. Управление электрохимическим реактором с проточными трехмерными электродами за счет оптимального распределения электропроводности системы / И.Г. Гвоздева, А.Н. Кошев, В.К. Варенцов // Управление большими системами: сб. трудов института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2010, № 29. – С. 184-200.
16. Процессы в пористом электроде в случае распределенной скорости протока электролита / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, И.Ф. Сухов, И.Г. Гвоздева // Математическое моделирование, 2013, Т. 25, № 2. – С. 97-110.
17. Кошев, А.Н. Красивые условия для дифференциальных уравнений, описывающих электрохимические процессы в реакторах с проточными трехмерными электродами / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов // Математическое моделирование, 2014, Т. 26, № 2. – С. 11-23.
18. Варенцов, В.К. Моделирование процесса газообразования водорода в проточных трехмерных электродах при извлечении металлов из растворов электролитов / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство, 2017, № 3 (32). – С. 128-135.
19. Кошев, А.Н. Влияние заполнения проточного объемно-пористого катода осаждающимся металлом на электропроводность твердой фазы системы электрод-электролит / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, Г.Н. Глейзер. // Электрохимия, 1992, Т. 28, № 8. – С. 1170-1176.
20. Теоретические основы и моделирование электрохи-

мических процессов в системах с проточными трех-мерными электродами: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, И.Ф. Сухов, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 128 с.

Статья поступила в редакцию 10.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 536.223

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0014

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БИНАРНЫХ И СМЕШАННЫХ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

©2021

Зеленков Геннадий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, начальник кафедры «Системный анализ и управление процессами на водном транспорте»

Данцевич Игорь Михайлович, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики»

Мышкина Алена Николаевна, аспирант

Государственный морской университет им. Адмирала Ф.Ф. Ушакова

(353924, Россия, Новороссийск, пр-т Ленина, 93,

e-mails: mathshell@mail.ru, dantsevich65@mail.ru, alena--n@mail.ru)

Аннотация. Повышение теплонапряженности составляющих судовой энергетической установки основано на использовании широчайшего ассортимента рабочих тел и теплоносителей, среди которых основное место занимают водные растворы электролитов. Высокоэффективное внедрение водных растворов электролитов требует исследования их теплофизических свойств в широком спектре характеристик состояния. Наличие данных по теплопроводности водных растворов способствует увеличению производительности, уменьшению материальных затрат на проектирование и эксплуатацию, а также гарантирует безаварийную работу судовых энергетических установок. Экспериментальные данные по теплопроводности бинарных смесей и смешанных растворов электролитов кроме практической значимости, представляют и значительный научный интерес, поскольку позволяет выявить температурные, барические и концентрационные зависимости теплопроводности, развить положения теории переноса тепла в жидкостях. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию теплопроводности бинарных и смешанных растворов электролитов в зависимости от их концентрации и температуры и оценке погрешностей ее измерения.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, водный раствор, бинарный раствор, электролит, смешанный раствор, теплопроводность, раствор солей, погрешность, достоверная вероятность.

ESTIMATION OF THE ACCURACY OF MEASURING THERMAL CONDUCTIVITY OF BINARY AND MIXED ELECTROLYTE SOLUTIONS

©2021

Zelenkov Gennady Anatolyevich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of the department "System analysis and process control in water transport"

Dantsevich Igor Mikhailovich, candidate of technical sciences, associate professor, head of the department "operation of ship electrical equipment and automation equipment"

Myshkina Alena Nikolaevna, postgraduate student

State Maritime University named after Admiral F.F. Ushakov

(353924, Russia, Novorossiysk, Lenin Ave., 93,

e-mails: mathshell@mail.ru, dantsevich65@mail.ru, alena--n@mail.ru)

Abstract. The increase in the heat intensity of the components of the ship's power plant is based on the use of the widest range of working fluids and coolants, among which the main place is occupied by aqueous solutions of electrolytes. The highly efficient introduction of aqueous solutions of electrolytes requires the study of their thermophysical properties in a wide range of state characteristics. The availability of data on the thermal conductivity of aqueous solutions contributes to an increase in productivity, a decrease in material costs for design and operation, and also guarantees the trouble-free operation of ship power plants. Experimental data on the thermal conductivity of binary mixtures and mixed solutions of electrolytes, in addition to practical significance, are also of considerable scientific interest, since they allow one to reveal the temperature, baric and concentration dependences of thermal conductivity, and to develop the provisions of the theory of heat transfer in liquids. This work is devoted to the experimental study of the thermal conductivity of binary and mixed solutions of electrolytes, depending on their concentration and temperature and estimation of errors of its measurement.

Keywords: marine power plant, aqueous solution, binary solution, electrolyte, mixed solution, thermal conductivity, salt solution, error, confidence level.

Введение. Водные растворы электролитов широко используются в судовых энергетических установках [1]. Одной из основных задач исследования бинарных и смешанных растворов электролитов является изучение их теплофизических свойств, в особенности теплопроводности [2]. Практически все технологиче-

ские процессы в промышленности сопряжены с подводом и отводом теплоты. Знание теплопроводности бинарных и смешанных растворов электролитов необходимо для надежного проектирования и правильной эксплуатации, для увеличения экономичности и снижения аварийности энергетических установок. Хотя

исследованию теплопроводности бинарных растворов и уделяется внимание в научной литературе [6], для практического их применения необходимы дополнительные усилия.

Целью статьи является оценка погрешностей измерения коэффициента теплопроводности бинарных и смешанных растворов электролитов – водных растворов солей *KF, KCl, KBr, KI* в зависимости от изменения их концентрации и температуры.

Материалы и результаты исследования. В таблицах 1, 2 перечислены виды исследованных растворов электролитов разной концентрации и приведены сведения об условиях проведения измерений – диапазонах изменения температуры и давления среды.

Таблица 1 – Условия исследования теплопроводности бинарных растворов электролитов [7]

Второй компонент раствора	Содержание электролита		Параметры состояния	
	Массовые доли	Мольные доли	Температура Т °К	Давление Р Мпа
KI	0,0689	0,0080	293-473	0,1-100
	0,1119	0,0135		
	0,1752	0,0225		
KBr	0,0439	0,0069	293-473	0,1-100
	0,0698	0,0112		
	0,1139	0,0191		
	0,1747	0,0310		
KCl	0,0506	0,0127	293-473	0,1-100
	0,1001	0,0262		
KF	0,0477	0,0150	293-473	0,1-100
	0,1313	0,0441		
	0,1992	0,0705		
KBr	0,1162	0,0195	293=503	0,1-100
	0,2225	0,0415	293-503	0,1-100
	0,3062	0,0626		
KI	0,1150	0,0139	263-503	0,1-100

Метод исследований: изучение теплопроводности водных растворов теплоносителей и рабочих тел в широкой области характеристик состояния реализован на закономерностях стационарного термического режима [8]. Из стационарных способов использован метод коаксиальных цилиндров. Измерительная ячейка состоит из 2-ух коаксиально расположенных

цилиндров, образующих конденсатор, измерение емкости которого позволяет вычислить коэффициент теплопроводности (рис. 1).

Ввиду неизотермичности по длине цилиндра измерительной ячейки, измеренное значение разности температур в измерительном зазоре подвергалась корректировке в соответствии с расчетным изменением температур по длине цилиндра – вводилась поправка на неизотермичность. Необходимость такой корректировки обоснована, в частности, в работе [15], где подобная поправка применялась в отношении измерительной ячейки, сделанной из нержавеющей стали.

При обработке результатов экспериментального исследования теплопроводности учитывалось также рассредотачивание температуры в поперечном сечении измерительной ячейки, и рассчитывалась поправка на установку термопар.

Способом электротепловых аналогий изучено температурное поле нагревателя измерительной ячейки. Установлено, что на расстоянии, равном трем диаметрам провода нагревателя, изотермы вырождаются в прямые линии, параллельные оси нагревателя. Это обстоятельство позволяет сделать равномерным тепловой поток нагревателя во внутреннем цилиндре [15].

Значение коэффициента теплопроводности для всех исследованных жидкостей не зависит от толщины слоя исследованного вещества, поэтому, воздействие радиационной составляющей теплового потока незначительно и лежит в границах погрешности измерений, поправки на излучение к измеренному значению коэффициента теплопроводности не требуется [16].

Коэффициент теплопроводности определяется косвенно по результатам измерений физических величин, вследствие чего погрешность полученного численного значения коэффициента зависит от точности методов измерений величин [18]. Общая погрешность определяется композицией случайных составляющих погрешности [19].

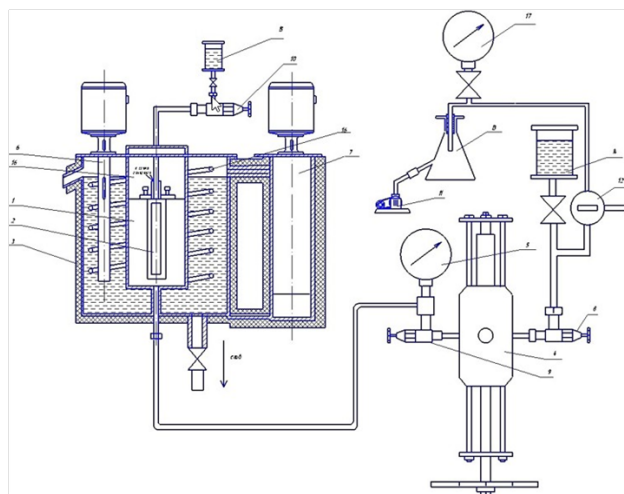


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для измерения теплопроводности

1 – автоклав; 2 – измерительная ячейка; 3 – жидкостный термостат; 4 – гидравлический пресс;

5, 17 – манометры; 6 – насос; 7 – камера тангенциального ввода; 8, 10 – вентили; 9 – вентиль системы заполнения;

11 – вакуумный насос; 12 – отсекающий кран; 13 – вакуумная колба; 14, 15 – стеклянные сосуды (контроля заполнения);

16 – медный холодильник

Расчет систематических случайных погрешностей определения коэффициента теплопроводности осуществлен для двух экспериментальных установок [19].

Результаты расчета погрешностей и доверитель-

ной вероятности представлены в таблицах 3 и 4 соответственно (I – смешанного раствора $H_2O-KBr-KI$ и воды, II – бинарного раствора H_2O-KBr и воды) Те же данные для наглядности представлены в виде графиков на рисунках 2, 3.

Таблица 2 – Условия исследования теплопроводности смешанных растворов электролитов [17]

Наименование раствора	Количество электролита в растворе, г		Общая концентрация солей М %	Область изменения параметров состояния	
	KI	KF		Температура Т° К	Давление Р Мпа
$H_2O-KI-KF$	28,600	61,431	19,36	300,7-471,5	0,1-100
	83,460	20,02	20,73		
	51,120	61,152	21,77		
	84,460	60,446	26,59		
	84,460	99,298	30,49		
$H_2O-KBr-KI$	17,876	30,870	11,66	299,5-471,5	0,1-100
	30,860	51,150	17,51		
	17,270	85,430	21,43		
	83,110	28,750	22,16		
	85,490	51,430	26,26		
	52,270	81,160	26,78		
	85,580	85,650	30,73		
$H_2O-KCl-KI$	45,170	51,240	19,25	300,7-471,5	0,1-100
	45,680	85,630	25,19		
$H_2O-KCl-KBr$	44,480	51,700	19,38	299,5-471,5	0,1-100
	44,480	84,500	24,38		
$H_2O-KF-NaF$	20,010	4,720	4,86	301,6-471,5	0,1-100
	20,015	9,800	5,80		

Таблица 3 – Результаты расчетов погрешностей измерения коэффициента теплопроводности

Наименование погрешности	Систематическая погрешность, Р		Оценка среднего квадратического отклонения S	
	I	II	I	II
Количество тепла, выделяемого нагревателем измерительной ячейки, Вт	0,024	0,022	0,0024	0,0022
Перепад температур в слое исследуемого вещества, К	0,0028	0,0024	0,1511	0,1495
Постоянная измерительной ячейки, м	0,0560	0,0611	0,2560	0,2579
Температура опыта, К	0,0127	0,0200	0,1801	0,4321
Теплопроводность исследуемого вещества, %	0,722	0,458	0,134	0,114
Концентрация раствора, %	0,232	-	0,232	-
Поправка на установку термометры, К	4,748	4,763	0,7941	0,7632
Поправка на падение напряжения в токоподводящих проводах нагревателя, Вт	0,2465	0,2379	0,062	0,059
Поправка на «неизотермичность» поверхностей коаксиальных цилиндров, %	0,0061	0,0093	0,193	0,229

Таблица 4 – Результаты расчетов доверительной вероятности общей погрешности результата измерений коэффициента теплопроводности и его составляющих

Наименование погрешности	Значение	
	I	II
Проверка выполнения неравенств $P_2: S_2 \geq 8$ и $P_3: S_3 \leq 0,8$	8,96 > 8	9,26 > 8
Коэффициент функции распределения композиции случайной и неисключенной систематической составляющих соответствующий доверительной вероятности	1,83	1,99
Оценка среднего квадратического отклонения	0,67	0,65
Доверительные границы погрешности результата измерений коэффициента теплопроводности, %	1,23	1,3

Результаты расчетов систематической и случайной погрешности измерения коэффициента теплопроводности на экспериментальной установке



Рисунок 2 – Результаты расчетов систематической и случайной погрешности измерения коэффициента теплопроводности

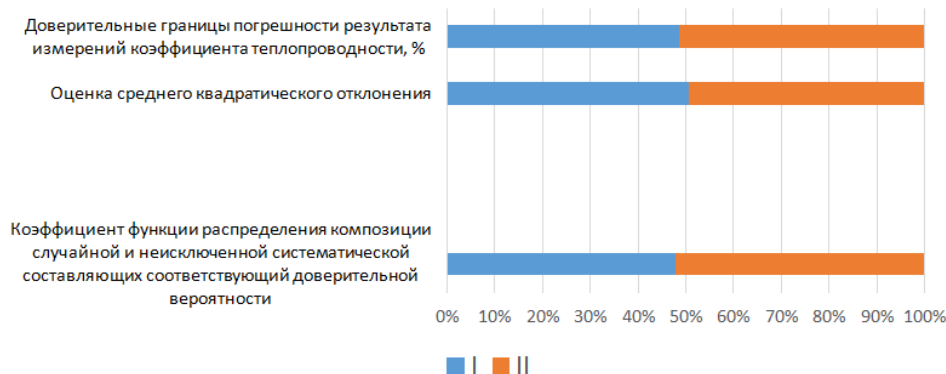


Рисунок 3 – Результаты расчетов доверительных границ общей погрешности результата измерений коэффициента теплопроводности и его составляющих

Заключение. В результате анализа результатов экспериментального исследования получено, что доверительная вероятность общей погрешности результата измерений коэффициента теплопроводности смешанного раствора $H_2O-KBr-KI$ и воды в интервале температур 283-463°K составляет $\pm(1,23 - 1,3)\%$ при коэффициенте доверительной вероятности 0,95.

В результате измерений коэффициента теплопроводности бинарного раствора H_2O-KBr и воды в интервале температур 293-523°K граница общей погрешности составляет: $\pm(1,6 - 1,9)\%$ при коэффициенте доверительной вероятности 0,95.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Косолап, Ю.Г. Теплопроводность смешанных растворов электролитов. Дис...канд. техн. наук. – Баку,1990. – 194 с.
2. Сафронов, Г.А. Теплопроводность водных растворов электролитов. Дис...канд. техн. наук. – Баку,1985. – 220 с.
3. Сергеев, О.А. Метрологические основы теплофизических измерений.-М.:Изд-во стандартов, 1972. – 154с.
4. Рабинович, С.Г. Погрешность измерений. – Л.: Энергия,1978.-261с. В кн.: Исследование в области тепловых измерений. – Л.: Энергия.1976. – С. 32-40.
5. Кудрявцева, Ж.Ф. Рабинович, С.Г. Методы обработки результатов наблюдений при косвенных измерениях. В кн. Методы обработки результатов наблюдений при измерениях. –Л.: ВНИИМ,1975. – С. 3-35.
6. Лыков, А.В. Теория теплопроводности.-М.: Высшая школа, – 1967. – 599с.
7. Григорьев, Е.Б., Сафронов, Г.А., Косолап, Ю.Г. Таблицы рекомендуемых справочных данных. Теплопроводность бинарных водных растворов солей галоидов щелочных металлов в диапазонах температур 290...470 К и давлениях 0,1...100 МПа. РСД ГСССД Р № 465, Деп. во ВНИЦСМВ 21.10.2002г. № 801-ООКК Госстандарта РФ, 2002. – 20 с.
8. Цедерберг, И.В. Теплопроводность газов и жидкостей. – М.: Наука, – 1963. – 409с
9. Филиппов, Л.П. Исследование теплопроводности жидкостей. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 239с.
10. Ишханов, А.М. Экспериментальное исследование теплопроводности воды и шестифтористой серы при высоких давлениях. Дис...канд. техн. наук.-Грозный, 1978. – 288с.
11. Васильев, В.П. Термодинамические свойства раствора электролита. – М.: Высшая школа,1982. – 320с.
12. Капустинский, А.Ф., Рузавин, И.И. Тепло – и электропроводность ионных растворов // Химия и хим. технология . – 1958. – №7. – С.11-16.
13. Литвиненко, И.В. Теплопроводность водных растворов электролитов и ее связь со структурой воды. Автореф. дис... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1968. – 20с.
14. Сулейманов, Л.Л. Гуренкова, Т.В. Усманов, А.Г. Зависимость радиационной составляющей коэффициента теплопроводности жидкостей от температуры // Химия и хим. технология . – 1958. – №7. – С.6-11.
15. Бубеева, И.А., Танганов, Б.Б. Экспериментальная установка для определения коэффициента теплопроводности растворов электролитов // Тр. 5-й междунар. конф. молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы современной науки». Естественные науки. Химия. Физическая химия, – Ч. 8.

– Самара, 2004. – С. 13-15.

16. Танганов, Б.Б., Бубеева, И.А. Теплопроводность водных растворов индивидуальных электролитов и их смесей // Актуальные проблемы современной науки: Тр. 3-й междунар. конф. молодых ученых. Естественные науки. 4.4-6. Секция: Физика. Химия. Науки о Земле, – С. 39-40. – Электронное издание. – Самара, 2002. – Web-сайт.- Системные требования: IBM PC, InternetExplorer (<http://povnian.sstu.edu.ru>). Гос. Пер. 0320201180.

17. Григорьев Е.Б., Григорьев Б.А. Таблицы рекомендуемых справочных данных. Теплопроводность смешанных водных растворов солей лантаноидов в диапазонах температур 290...470 К и давлениях 0,1...100 МПа. РСД ГСССД Р № 464, Деп. во ВНИЦСМВ 21.10.2002 г. № 800-ООКК Госстандарта РФ, 2002. – 20 с.

18. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М. Гидродинамика.-М.: Наука, 1986.– 438 с.

19. Григорьев, Е.Б. Относительная теплопроводность воды и водных растворов в зависимости от давления. Тезисы докладов шестой научно-технической конференции «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса». РГУ нефти и газа. – Москва, 26-27 января, 2005. – С.46.

20. Григорьев Е.Б. Кинематическая вязкость бинарных водных растворов солей лантаноидов. Известия вузов, Нефть и газ, №3,1993. – С.44.

Статья поступила в редакцию 15.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 004.451

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0015

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СОВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

© 2021

Синев Михаил Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника»
Пензенский государственный университет

(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: mix.sinev@gmail.com)

Мартышкин Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Программирование»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: alexey314@yandex.ru)

Аннотация. В статье проведено исследование трех современных алгоритмов планирования операционных систем реального времени. Экспериментальное исследование алгоритмов планирования, выполнялось на базе аппаратной платформы *STM32F407G-DISC1*. Программная основа для исследования алгоритмов – операционная система *FreeRTOS*, которая имеет возможность работать в двух режимах – с вытесняющей и кооперативной многозадачностью. Экспериментально реализованы алгоритмы планирования: *Rate Monotonic*, *Earliest Deadline First* и *Background*. Для каждого из них синтезировались функции создания задач, которые планируются в системе. На базе планировщика *FreeRTOS* реализован принцип работы каждого из перечисленных алгоритмов. После подготовки к реализации алгоритмов планирования проводились непосредственно эксперименты с последующей проверкой их работоспособности. Исследования алгоритмов планирования операционных систем реального времени производились на основе показателей – длительность переключения контекста и эффективность планировщика. Проведены эксперименты с разным количеством задач для определения тенденции изменения каждого из параметров. Основные полученные результаты наглядно показаны на графиках. В результате исследования представлены рекомендации для выбора определенного алгоритма планирования при конкретных типах задач и значениях загрузки. В заключении сформулированы основные выводы по проделанной работе.

Ключевые слова: аппаратная реализация, операционная система, система реального времени, встраиваемая система, алгоритмы планирования, планировщик, эффективность.

HARDWARE IMPLEMENTATION AND RESEARCH OF SOME MODERN ALGORITHMS FOR PLANNING REAL-TIME OPERATING SYSTEMS

© 2021

Sinev Mihail Petrovich, candidate of technical sciences,
associate professor of sub-department «Computer engineering»

Penza State University

(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: mix.sinev@gmail.com)

Martyshev Alexey Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, head of sub-department «Programming»

Penza state technological University

(440039, Russia, Penza, BaydukovProyezd / Gagarin Street, 1a/11, e-mail: alexey314@yandex.ru)

Abstract. The article studies three modern algorithms for planning real-time operating systems. An experimental study of scheduling algorithms was performed on the basis of the *STM32F407G-DISC1* hardware platform. The software basis for the study of algorithms is the *FreeRTOS* operating system, which has the ability to work in two modes – with preemptive and cooperative multitasking. Planning algorithms have been experimentally implemented: *Rate Monotonic*, *Earliest Deadline First* and *Background*. For each of them, the functions of creating tasks that are planned in the system were synthesized. The principle of operation of each of the listed algorithms is implemented on the basis of the *FreeRTOS* scheduler. After preparing for the implementation of the planning algorithms, experiments were carried out directly with subsequent verification of their operability. Studies of algorithms for planning real-time operating systems were carried out on the basis of indicators - the duration of context switching and the effectiveness of the scheduler. Experiments were conducted with a different number of tasks to determine the trend of change in each of the parameters. The main results obtained are clearly shown in the graphs. As a result of the study, recommendations are presented for choosing a specific scheduling algorithm for specific types of tasks and load values. In conclusion, the main conclusions on the work done are formulated.

Keywords: hardware implementation, operating system, real-time system, embedded system, scheduling algorithms, scheduler, efficiency.

Введение. Алгоритм планирования – неотъемлемая часть любой операционной системы, во основном определяющая эффективность использования аппа-

ратных ресурсов 1 встраиваемой вычислительной системы (многопроцессорной, многоядерной, распределенной) [1]. Главным образом от алгоритма пла-

нирования зависит, какая задача будет выполняться в системе реального времени в каждый момент [2-3]. Время срабатывания системы или реакции на внешнее воздействие имеет большую роль, и медленная реакция может привести к непредсказуемым последствиям.

Цель работы – исследование и сравнение некоторых востребованных алгоритмов планирования операционных систем реального времени.

Объект исследования – операционная система реального времени для встраиваемых систем.

Предмет исследования – аппаратно реализованные алгоритмы планирования.

Материалы и результаты исследования. В статье для достижения поставленной цели решаются задачи: аппаратная реализация некоторых известных алгоритмов планирования на базе платформы *STM32F407G-DISCI*; экспериментальные исследования с аппаратно реализованными алгоритмами.

В работах [4-8], [9-11] и [12-14] приведены известные алгоритмы планирования операционных систем реального времени (ОСРВ). Проанализированы наиболее популярные из них. Для оценки производительности функций операционных систем применяют программное обеспечение, аналогичное представленному здесь [15, 16]. В этой статье попытаемся подойти к вопросу исследования современных алгоритмов планирования операционных систем реального времени для встраиваемых систем со стороны их аппаратной реализации и дальнейшего анализа. Представим результаты оценки таких характеристик алгоритмов планирования, как переключение контекста и коэффициент эффективности планировщика.

Реализация алгоритмов планирования, выполня-

лась на аппаратной платформе *STM32F407G-DISCI* [17]. Программой основой для исследования алгоритмов является операционная система *FreeRTOS*, которая может работать в двух режимах – с вытесняющей и кооперативной многозадачностью [18]. Во *FreeRTOS*, задачи, готовые к выполнению, представляют собой структуры и хранятся в виде упорядоченных закольцованных двусвязных списков [19, 20]. Для реализации алгоритмов подготовлены специальные списки задач для хранения готовых к исполнению задач. На платформе *STM32F407G-DISCI* с ОСРВ *FreeRTOS* реализованы алгоритмы планирования: *Rate Monotonic*, *Earliest Deadline First* и *Background*. Для каждого из перечисленных алгоритмов синтезировались функции создания задач, которые планируются в системе. На базе планировщика *FreeRTOS* реализован принцип работы каждого из перечисленных алгоритмов. После подготовки к реализации алгоритмов планирования проводились непосредственно эксперименты с последующей проверкой их работоспособности.

Для проверки работоспособности алгоритма *Rate Monotonic* создано 3 периодических задачи (с одинаковым временем выполнения, равным 9 нс) с периодами 35 нс, 40 нс и 50 нс соответственно. Значение коэффициента загрузки для такого набора задач составило 68%, что является допустимой и говорит о том, что данные задачи могут планироваться с использованием алгоритма *Rate Monotonic*.

Получены трассировочные данные, для наглядного их отображения построим схематический график, представленный на рисунке 1, где зафиксированы время выполнения и тип задачи, выполняемой в определенный момент времени.

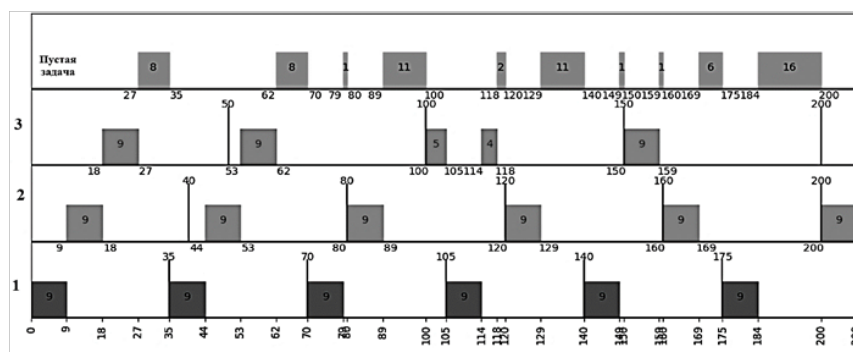


Рисунок 1 – Результат работы алгоритма *Rate Monotonic*

Проведя анализ полученных трассировочных данных, можно подтвердить, что алгоритм работает верно, т.к. в каждый момент планирования происходит выбор задачи с наименьшим периодом. Наиболее отчетливо это можно видеть во временном интервале с 100 по 118 миллисекунду, где первоначально управление получает 3-я задача (100 мс), но после появления первой задачи в списке готовых, 3-я задача (105 мс) вытаскивается и только после выполнения первой задачи (114 мс), продолжает выполняться (114-118 мс).

Для алгоритма *Rate Monotonic* произведены вре-

менные замеры длительности переключения контекста на входе и выходе из функции *vTaskSwitchContext*. Более того, проводилось фиксирование длительности трассировочных конструкций на входе и выходе функции, значения которых составили по 7,1 мкс.

Кроме показателя времени переключения контекста, для оценки алгоритма планирования известно понятие коэффициент эффективности планировщика – отношение среднего времени переключения контекста к минимальному времени выполнения задач. Чтобы оценить длительность времени переключения

контекста проведены тестовые запуски системы с 1, 3, 5, 7 и 9 задачами.

Результаты оценки этих параметров можно увидеть на рисунке 2.

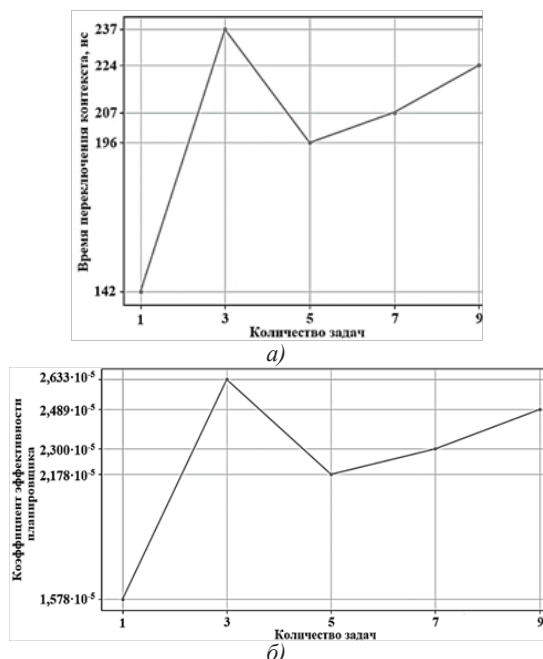


Рисунок 2 – Зависимость времени переключения контекста от количества задач (а); коэффициента эффективности планировщика от количества задач (б) алгоритма Rate Monotonic

Из рисунка 2,а видно, что время переключения контекста алгоритма Rate Monotonic находится в интервале от 142 нс до 237 нс и среднее время составляет 201 нс. По рисунку 2,б можно определить среднее значение коэффициента эффективности планировщика, которое составило $2,2236 \cdot 10^{-5}$.

Для проверки работы алгоритма Earliest Deadline

First (EDF) создано 3 периодических задачи (время выполнения, равное 9 нс на задачу) с периодами 20 нс, 30 нс и 40 нс соответственно. Значение коэффициента загрузки для такого набора задач составило 97,5%. Получены представленные ниже трассировочные данные (рис. 3).

После анализа полученных данных подчеркнем, что алгоритм работает верно, т.к. в каждый момент планирования происходит выбор задачи с ранним крайним сроком.

Отличительные черты исследуемого алгоритма можно проследить с 27 нс по 45 нс. В начале управление получает первая задача (27 нс). В 30 наносекунду в список готовых задач возвращается 2-я задача, поскольку наступил ее новый период. Однако 2-я задача не вытесняет первую, поскольку первая имеет более ранний крайний срок выполнения (40 нс), чем 2-я (60 нс).

Для оценки длительности переключения контекста проведены эксперименты с 1, 3, 5, 7 и 9 задачами. Результаты оценки этих параметров можно увидеть на рисунке 4.

По рисунку 4,а определим, что время переключения контекста для алгоритма EDF находится в промежутке от 214 нс до 228 нс и среднее время составляет 221 нс. По рисунку 4,б определим среднее значение коэффициента эффективности планировщика, которое составило $2,46 \cdot 10^{-5}$.

Далее покажем результат исследования алгоритма Background. Были созданы 2 периодические задачи со следующими характеристиками: время выполнения – 9 нс на задачу и периодами 20 нс и 40 нс соответственно, и 2 аperiodических запроса с характеристиками: время выполнения – 9 нс на задачу. Система с указанными характеристиками была протестирована, получены трассировочные данные (рис. 5).

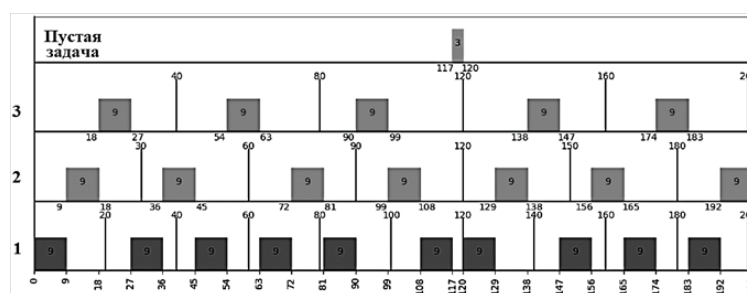


Рисунок 3 – Результат работы алгоритма Earliest Deadline First

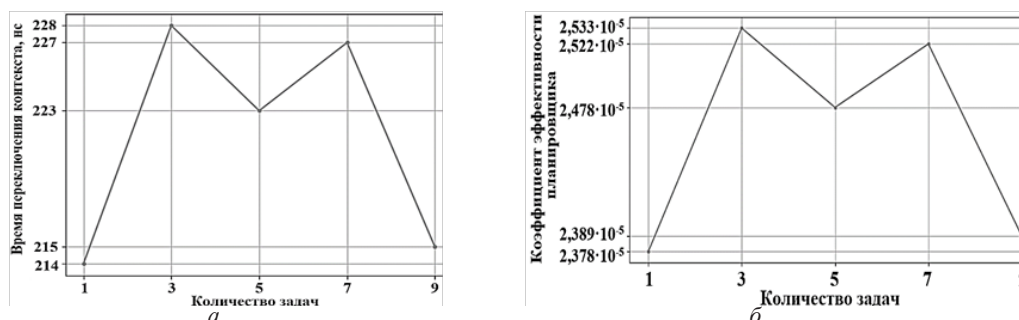


Рисунок 4 – Зависимость времени переключения контекста от количества задач (а); коэффициента эффективности планировщика от количества задач (б) алгоритма Earliest Deadline First

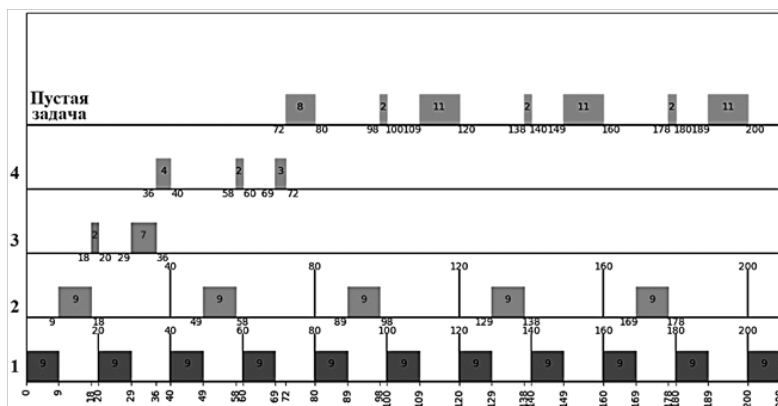


Рисунок 5 – Результат работы алгоритма Background

После анализа полученных данных резюмируем, что алгоритм функционирует корректно, т.к. аperiodические запросы выполняются в моменты времени, когда отсутствуют периодические задачи.

Отличительные черты, присущие этому алгоритму, прослеживаются с 0 по 72 нс. В начале управление получают первая и вторая периодические задачи до 18 нс. Затем начинают выполняться аperiodические задачи в оставшихся временных “окнах”. С 18 нс по 20 нс и с 29 нс по 36 нс выполняется аperiodический запрос (3-я задача), после выполнения которого управление получает вторая аperiodическая задача (4-я задача) во временных промежутках с 36 нс по 40 нс, с 58 нс по 60 нс и с 69 нс по 72 нс, когда отсутствуют периодические задачи.

Для оценки длительности переключения контекста проведены эксперименты с 1, 3, 5, 7 и 9 задачами. Результаты оценки этих параметров можно увидеть на рисунке 6.

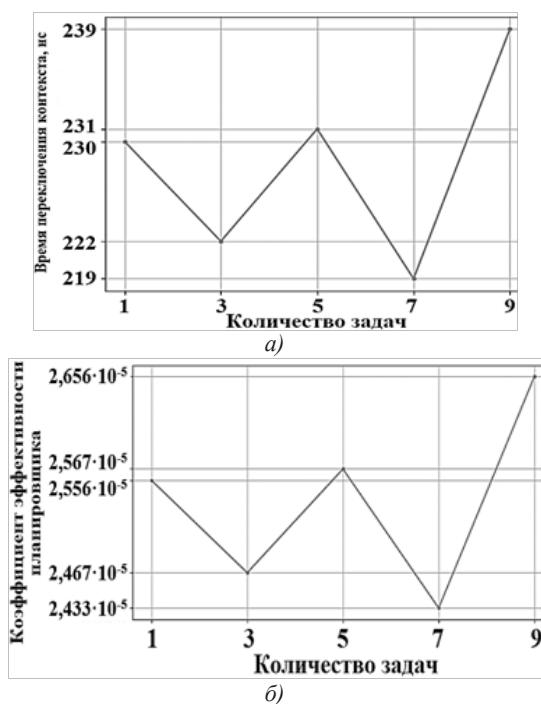


Рисунок 6 – Зависимость времени переключения контекста от количества задач (а); коэффициента эффективности планировщика от количества задач (б) алгоритма Background

По рисунку 6,а определим, что время переключения контекста для алгоритма Background находится в промежутке от 219 нс до 239 нс и среднее время составляет 228 нс. По рисунку 4,б определим среднее значение коэффициента эффективности планировщика, которое составило $2,536 \cdot 10^{-5}$.

Сравнение алгоритмов. Для сравнения приведенных выше алгоритмов использованы данные, полученные при анализе каждого из исследованных и приведенных в работе из алгоритмов. Эксперименты проводились для 1, 3, 5, 7 и 9 задач с целью определения времени переключения контекста и коэффициента эффективности планировщика.

Анализируя полученные в работе данные, можно сказать о том, что для алгоритмов EDF и Background, изменение количества задач, выполняющихся в системе, никак не влияет на время переключения контекста.

Также был проанализирован вопрос изменения коэффициента эффективности планировщика. Получено, что коэффициент эффективности для RM, EDF и Background является постоянным.

После проведения экспериментов составлена таблица 1, в которой отображаются характерные черты рассмотренных алгоритмов планирования и временные параметры, полученные в ходе исследования. В таблице приняты обозначения переменных: Sw – среднее время переключения контекста; Eff – среднее значение коэффициента эффективности планировщика.

Таблица 1 – Сравнение исследуемых алгоритмов планирования

Алгоритм	Тип	Макс. загрузка	Sw, нс	Eff
Rate Monotonic	Статический	$n \cdot \left(2^{\frac{1}{n}} - 1\right)$	201	$2,236 \cdot 10^{-5}$
Earliest Deadline First	Динамический	<100%	221	$2,46 \cdot 10^{-5}$
Background	Динамический	$n \cdot \left(2^{\frac{1}{n}} - 1\right)$	228	$2,536 \cdot 10^{-5}$

Анализируя представленные в таблице 1 значения, можно сказать, что наиболее оптимальным алгоритмом для планирования периодических задач при значениях загрузки меньше чем $n \cdot \left(2^{\frac{1}{n}} - 1\right)$, где n – число задач, является алгоритм Rate Monotonic, поскольку он имеет наименьшее время переключения контекста

и наименьшее значение коэффициента эффективности планировщика. Для планирования периодических задач при значениях загрузки больше, чем $n \cdot \left(2^n - 1\right)$ оптимальным выбором является алгоритм *Earliest Deadline First*. По полученным данным видно, что для планирования аperiodических задач оптимальным выбором является алгоритм *Background*, но только в том случае, если аperiodические задачи в системе не имеют жестких сроков (системы мягкого реального времени).

Заклучение. Исследования алгоритмов планирования операционных систем реального времени производились на основе двух показателей – длительность переключения контекста и коэффициент эффективности планировщика. Проведены эксперименты с разным количеством задач для определения тенденции изменения каждого из параметров. В результате получены и представлены рекомендации для выбора определенного алгоритма планирования при конкретных типах задач и значениях загрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Данилов М.В. Методы планирования выполнения задач в системах реального времени // Программные продукты и системы. – 2001. – № 4. – С. 28-35
2. Методы планирования выполнения задач в системах жесткого реального времени: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.13.11 / С.-Петербург. ин-т информатики и автоматизации РАН. – Санкт-Петербург, 2002. – 16 с.
3. Бурдонов, И. Б. Операционные системы реального времени / И.Б. Бурдонов, А. С. Косачев, В.Н. Пономаренко // Препринт Института системного программирования РАН. – 2006. – №14. – С. 3.
4. Таненбаум, Э. Современные операционные системы / Э. Таненбаум, Х. Бос. 4-е изд. – Санкт-Петербург: Питер, 2015. – 602 с.
5. Audsley, N. C. Applying new scheduling theory to static priority preemptive scheduling / N.C. Audsley, A. Burns, M. Richardson, K. Tindell, A. Wellings // Software Engineering Journal. – 2002. – Vol. 8. - № 5. – P. 1.
6. Мартышкин А.И. Анализ наиболее перспективных алгоритмов планирования операционных систем реального времени // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. 2020. № 1 (7). С. 278-287.
7. Мартышкин А.И. Современные направления развития встраиваемых операционных систем // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. 2018. № 1 (5). С. 262-271.
8. Panigrahi R. L. Real Time System for Software Engineering: An Overview / R. L. Panigrahi and M.K. Senapaty // Global Journal for Research Analysis. – 2014. – Vol. 3. – Issue 1. – P. 25-27.
9. Alan Burns and Andy Wellings (2009), Real-Time Systems and Programming Languages (4th ed.), Addison-Wesley, ISBN 978-0-321-41745-9
10. Bini, E. The space of rate monotonic schedulability / E. Bini, G.C. Buttazzo // IEEE Real-Time Systems Symposium. – 2002. - №23. – P. 1.
11. Buttazzo G.C. Hard Real-Time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications (Real-Time Systems Series) / G.C. Buttazzo. – 3rd ed. – London: Springer, 2011. – P. 130, P. 143.
12. Мартышкин А.И. Исследование алгоритмов планирования процессов в системах реального времени. Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов: сборник статей XIII Всероссийской научно-технической конференции. Под редакцией И.И. Сальникова. 2015. С. 118-124.
13. Carraro E. Implementation and Test of EDF and LLREF Schedulers in FreeRTOS // Site Regensburg University of Applied Sciences – 2016 [Электронный ресурс]. URL: http://tesi.cab.unipd.it/51896/1/Implementation_and_Test_of_EDF_and_LLREF_Scheduler_in_FreeRTOS.pdf (дата обращения: 12.10.2016).
14. Marko Bertogna M. C. Improved schedulability analysis of edf on multiprocessor platforms / M.C. Marko Bertogna, G. Lipari // Euromicro Conference on Real-Time Systems. – 2005. – №17. – P. 2.
15. Мартышкин А.И. Программа для измерения производительности некоторых функций операционных систем. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016619353, 18.08.2016. Заявка № 2016616799 от 27.06.2016.
16. Мартышкин А.И. Программа для расчета основных вероятностно-временных характеристик подсистемы планирования и диспетчеризации многопроцессорных систем. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016619353, 18.08.2016. Заявка № 2016616801 от 27.06.2016.
17. GitHub - gyaesu/STM32F407G-DISC1: Learning to programme the STM32F4 microprocessor via the Embedded.fm tutorial series [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/gyaesu/STM32F407G-DISC1> (дата обращения: 13.11.2021).
18. Курниц, А. FreeRTOS – операционная система для микроконтроллеров / А. Курниц // Компоненты и технологии. – 2011. – №2. – С. 97.
19. Kase R. Efficient Scheduling Library for FreeRTOS // Site Digital Scientific Archive in Sweden and Countries of Northern Europe – 2016 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1085303/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 23.11.2016).
20. Liu C. L. Real-time systems / C. L. Liu. - Albuquerque, New Mexico: Integre Technical Publishing Co, 2000. – P. 69, P. 192.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-00110, <https://rscf.ru/project/21-71-00110/>.

Статья поступила в редакцию 01.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 620.9:658.26

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0016

ОБЗОР ПРОТОКОЛОВ И СТАНДАРТОВ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

© 2021

Зикирбай Куаныш, phd, докторант Института автоматизации и информационных технологий
кафедры «Робототехника и технические средства автоматизации»

НАО КазНИТУ имени К.И. Сатпаева

(050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22 e-mail: kuanish_921@mail.ru)

Михайлов Петр Григорьевич, доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник Центра сопровождения научных исследований

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, 1А/11 e-mail: pit_mix@mail.ru)

Бактыбаев Мурат Кыргызбаевич, кандидат физико-математических наук,
ассоциированный профессор Института автоматизации и информационных технологий

НАО КазНИТУ имени К.И. Сатпаева

(050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22, e-mails: m.baktybayev@satbayev.university)

Аннотация. Быстрый рост устройств и систем, подключенных к Интернету, позволил Интернету вещей стать одной из важных областей информационных технологий. Стандарты, технологии и платформы, ориентированные на экосистему Интернета вещей, развиваются очень быстрыми темпами. Интернет вещей позволяет корреспондентам обмениваться данными и координировать решения в различных областях и сферах, включая здравоохранение, домашнее оборудование, возникающие аварийные ситуации и промышленные технологии. Ожидается, что в будущем эти сферы и области расширятся до еще большего числа приложений. В статье содержится краткий обзор возможностей нескольких всемирных информационных стандартов, которые позволяют использовать технологии, обеспечивающие быстрый рост Интернета вещей. Приведено обоснование некоторых перспективных технологий Интернета вещей. Рассмотрены общепринятые стандарты, используемые повсеместно в локальных и удаленных сетях, приведены их основные качественные параметры.

Ключевые слова: интернет вещей, локальные сети, удаленные сети, экосистема, технологии

OVERVIEW OF PROTOCOLS AND STANDARDS FOR INTERNET SENSORS

© 2021

Zikirbai Kuanysh, phd, doctoral student of the institute of automation and information technologies
of the department of robotics and automation equipment

K.I. Satpayev KazNITU

(22 Satpayev str., Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: kuanish_921@mail.ru)

Mikhailov Pyotr Grigoryevich, doctor of technical sciences, professor,
leading researcher of the center for scientific research support

Penza State Technological University

(440039, Russia, Penza, Baydukova Passage/Gagarina Street, 1A/11 e-mail: pit_mix@mail.ru)

Baktybaev Marat Kyrgyzbaevich, candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor of the institute of automation and information technologies

K.I. Satpayev KazNITU

(050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev str., 22, m.baktybayev@satbayev.university)

Abstract. The rapid growth of devices and systems connected to the Internet has allowed the Internet of Things to become one of the important areas of information technology. Standards, technologies and platforms focused on the Internet of Things ecosystem are developing very rapidly. The Internet of Things allows correspondents to exchange data and coordinate solutions in various fields and spheres, including healthcare, home equipment, emerging emergencies and industrial technologies. It is expected that in the future these areas and areas will expand to even more applications. The article provides a brief overview of the capabilities of several global information standards that allow the use of technologies that ensure the rapid growth of the Internet of Things. The substantiation of some promising technologies of the Internet of Things is given. The generally accepted standards used everywhere in local and remote networks are considered, their main qualitative parameters are given.

Keywords: internet of things, local area networks, remote networks, ecosystem, technologies.

Введение. Интернет вещей (IoT) приобретает большой интерес и популярность как в промышленности, так и в научных сферах. Его основное преимущество состоит в том, чтобы создать интеллектуальные устройства типа «plug-and-play», которые можно развертывать в любой среде и которые могут

обмениваться данными и взаимодействовать с другими устройствами. Это стало возможным только с недавней эволюцией интернет-протоколов, сенсорных устройств, эффективных вычислений, анализа больших данных и межмашинного взаимодействия (M2M). Согласно отчету международной аналитиче-

ской компании *IDC*, в РФ прогнозируется стабильный интерес к *IoT* технологиям и ожидается, что среднегодовые темпы роста на период до 2023 достигнут двухзначного значения – 19,7%.

Терминологически понятие «Интернет вещей» состоит из двух составляющих: «Интернет» и «вещи». *IoT* позволяет вещам или некомпьютерным устройствам слышать, видеть, думать, вычислять и организовано действовать, что дает возможность им общаться и координировать друг друга при принятии решений. Другими словами, это позволяет вещам действовать разумно и принимать консенсусные решения, приносящим пользу многим приложениям. Они превращают объекты или сенсоры из пассивных наблюдателей в активные объекты, имеющие возможность сотрудничества и принятия важных решений. Фундаментальные технологии встроенных мощных датчиков, новые вычислительные парадигмы, аналитика данных, облегченная связь и интернет-протоколы побуждают *IoT* предлагать указанные важные услуги и действия, однако они же создают потребность в специализированных стандартах и протоколах связи для решения возникающих проблем [1-5].

IoT играет важную роль в различных типах приложений, включая здравоохранение, транспорт, автоматизацию, сельское хозяйство, транспортные средства и экстренное реагирование на стихийные бедствия. Кроме того, ожидается, что он будет играть дополнительную роль в улучшении качества жизни, бизнес-приложений и умных домов. Примером доступной в настоящее время экосистемы *IoT* являются

умные дома, оснащенные датчиками, которые служат для удаленного контроля температуры, тепла и кондиционирования воздуха [6-10]. Будущие расширения такой системы могут включать приготовление кофе, управление телевизором, отслеживание личной статистики здоровья и вождение наших транспортных средств. Эти приложения вызовут дополнительные проблемы и потребуют стандартов для удовлетворения разнообразных требований приложений. Мы представляем стандарты, разработанные соответствующими законодательными коллективами: инженеров Интернета – *IETF*, института инженеров электротехники и радиоэлектроники – *IEEE*, международным союзом электросвязи – *ITU* и другими органами метрологии и стандартам. Кроме того, мы кратко обсудим о технологиях который широко применяется в *IoT*.

Материалы и результаты исследования. *Экосистема Интернета Вещей.* При нынешнем повышенном исследовательском интересе к *IoT* каждый год стандартизируется множество новых протоколов. Постоянно публикуются обзоры, освещающие различные аспекты стандартизации в области *IoT* [11-13]. Так, в [14] обобщены наиболее важные стандарты, которые предлагались различными организациями по стандартизации, основное внимание в которых обращено на такие проблемы *IoT*, как мобильность и масштабируемость. В статье представлен обзор новых стандартов, проектов и протоколов, расширяющих информацию, представленную в ранее представленной аналитике [14].

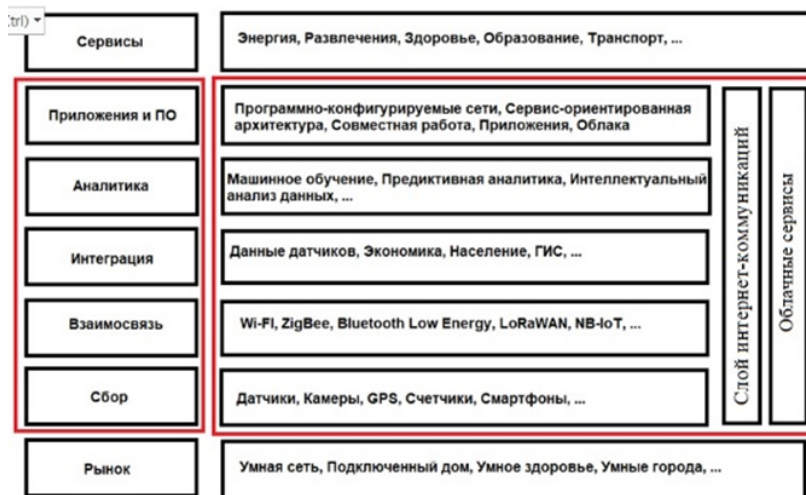


Рисунок 1 – Экосистема Интернета вещей

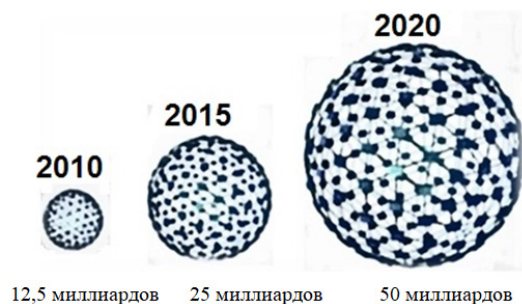
Как приведено на рисунке 1 *IoT*, можно представить в виде многослойной математической модели, в которой в нижнем слое могут быть объекты как бытового и промышленного уровня. Следующий, второй слой (главный слой-ядро системы) включает в себя сенсоры, часто интеллектуальные, тип, количество и распределение которых определяется задачами и функциями системы. В качестве сенсоров могут быть сенсоры неэлектрических параметров, тепла, электрических величин, оптические сенсоры. Следующий

слой обеспечивает надежные интерфейсные связи, которые обеспечивают качественную передачу, при этом информативность и корректность данных проверяются программными и интеллектуальными системами.

Рисунок 2 иллюстрирует рост затрат (в долларах) на реализацию концепции *IoT*, на котором отчетливо видно значительный объем затрат на разработку и внедрение системы интернета вещей.

Приложение ближней зоны охвата IoT. Стандартом связи для уровня передачи данных, который ши-

роко используется в *IoT*, является *Bluetooth* с низким энергопотреблением или *Bluetooth Smart*. *Bluetooth Smart* в основном используется в автомобильных сетях и характеризуется небольшой задержкой, которая в 15 раз меньше, чем у других стандартов *Bluetooth* и малым энергопотреблением, примерно в десять раз меньше, чем у классического *Bluetooth*. а контроль доступа использует *MAC* без конкуренции с низкой задержкой и быстрой передачей. Данный стандарт использует архитектуру главный/подчиненный и обеспечивает два типа инженерии знаний: рекламные модули (страницы) и модули опытных данных.



12,5 миллиардов 25 миллиардов 50 миллиардов
Рисунок 2 – Статистика затрат на разработку и внедрение системы *IoT* [10]

Режим обеспечения оптимального энергопотребления (спящий-бодрствующий) реализуется с использованием оповещающих сигналов от ведущего устройства к ведомому при этом устройства бодрствуют только при общении, иначе они остаются в спящем режиме [15, 16].

Приложение средней зона охвата. ZigBee Smart Energy. *ZigBee* в настоящее время является в наибольшей степени распространенным в *IoT*, так как его функциональные возможности и зона покрытия, обеспечивает большинство бытовых объектов, больниц и системах управления. Он обеспечивает управление изделиями и объектами объединенных в различные топологии (звезда, однослойная и многослойные сети).

Если рассматривать топологию *IoT*, включенную по типу «звезда», то координатор, регулирующий систему, может располагаться в центре, в корне, а также в разных точках топологии.

Стандарт *ZigBee* включает две разновидности: и *ZigBee Pro*, которые могут формировать общую сетевую структуру, функционируя с разными приложениями, при этом позволяет работать с малыми объемом

памяти и вычислительной мощностью. *ZigBee Pro* может реализовывать больше функций, чем *ZigBee*, в том числе обеспечить информационную безопасность при применении функции взаимного обмена симметричными ключами, регулируемость масштаба с использованием вероятностного

Приложение дальней зоны охвата и расширенных функциональных возможностей. LoRaWAN. Протокол *LoRaWAN* является недавно разработанной новой технологией беспроводной глобальной сети с большим радиусом действия, предназначенная для приложений *IoT*. Разработанный для масштабируемых беспроводных сетей с миллионами устройств, этот стандарт поддерживает избыточную работу, не реагирует на место дислокации, низкую стоимость, низкое энергопотребление. В *LoRaWAN* используется различная технология сбора электроэнергии для обеспечения прогнозируемых возможностей *IoT*, одновременно сохраняя при этом простую эксплуатацию, перенастройку и явность применения ее возможностей [18].

Weightless – это недавно созданная беспроводная технологическая платформа для *MAC IoT*, которую предоставляет некоммерческая глобальная организация *Weightless (SIG)*. Можно использовать два стандарта: *Weightless-N* и *Weightless-W*. *Weightless-N* был первым стандартом, разработанным для поддержки требований *IoT* с использованием *TDMA* со скачкообразной перестройкой частоты для минимизации помех. Он использует сверхузкие полосы в диапазоне частот *ISM* ниже 1 ГГц. С другой стороны, *Weightless-W* предоставляет те же возможности, но использует частоты телевизионного диапазона [19].

EnOcean – это энергосберегающая беспроводная технология, которая в основном используется для автоматизации, но может использоваться и для других приложений *IoT*. Основная идея этого протокола состоит в использовании любого типа энергии окружающей среды (перемещения, тепла, вибраций, света, ветра и проч.) и преобразовании ее в полезную энергию с помощью энергетических преобразователей (солнечных фотоэлементов, пьезокерамики и т.д.). Этот протокол имеет относительно небольшой размер пакета и в основном используется в приложениях *IoT* для отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в помещениях [20].

В таблице 1 приведены основные технические параметры технологических платформ *IoT* [21].

Таблица 1 – Основные характеристики технологических платформ *IoT*

Характеристики	ZigBee	Bluetooth	Wi-Fi	434/868 МГц	GSM/GPRS/EDGE	3G
Частотный диапазон, МГц	2400–2483	2400–2483	2412–2484	434/868	900/1800	1885–2025; 2110–2200
Скорость передачи данных, кбит/с	250	721	11000/54000	500	14,4/171/473	144/384/2048
Дальность связи, м	200	класс 1 - 100;	100	1000	во всей зоне покрытия	во всей зоне покрытия
Потребление тока, active мА/sleep мкА	30/1	70/20	450	30/1	350/3500	350/3500
Модуляция, доступ к среде	DSSS	FHSS	DSSS	FHSS	TDMA/ FDMA	TDMA/ FDMA/CDMA
Частотный диапазон, МГц	2400–2483	2400–2483	2412–2484	434/868	900/1800	1885–2025; 2110–2200

Заклучение. Представленный обзор технологий передачи данных для *IoT* позволяет выбрать протокол для *IoT*, исходя из их стоимости и функциональных возможностей. Многие из рассмотренных протоколов были разработаны и стандартизированы *IETF*, *IEEE*, *ITU* и другими организациями, а многие другие все еще находятся в разработке. Обсуждение было достаточно кратким из-за большого количества информации по данному направлению. Поставленная цель проведенных аналитических исследований состояла в том, чтобы ознакомить разработчиков и поставщиков услуг представлением об альтернативных для различных уровней протоколов в *IoT* и предоставить рекомендации по их выбору. Кратко рассмотрены различные протоколы передачи данных с указанием их основных различий и возможностей при доступе к среде Интернета вещей. Эти протоколы в основном разработаны *IEEE*, *ITU* или другими организациями по стандартизации беспроводной связи.

Среди них в *IoT* наиболее широко используются стандарты *Bluetooth* и *ZigBee*. Показано, что некоторые провайдеры и рынки *IoT* в поиске более надежных и защищенных технологий будут использовать *HomePlug* для подключения к локальной сети. Недавно появившийся протокол *LoRaWAN* предполагается использовать для применения в системах дальнего действия (удаленные системы) [18-20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден: пер. Ю.А. Заболотной под редакцией Е.Л. Свицова. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Портал о современных технологиях мобильной и беспроводной связи [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL: <http://1234g.ru/novosti/iiot-v-rossii-i-mire> (дата обращения 1.08.2021 г.).
3. Официальный сайт ОАО НИИФИ – Режим доступа : <http://www.niifi.ru>, свободный. – Яз. рус..
4. Официальный сайт BD Sensors GmbH – Режим доступа : <http://www.bdsensors.de>, свободный. – Яз. нем.
5. Гусев, Д.В. Микроэлектронные преобразователи давления для средств регулирования и мониторинга технологических процессов в энергосберегающих системах // Датчики и системы. – 2011. – №4. – С. 49-52.
6. Официальный сайт Keller Group GmbH – Режим доступа : <http://www.keller-druck.com>, свободный.
7. Официальный сайт Kulite Semiconductor Inc – Режим доступа : <http://www.kulite.com>, свободный.
8. Официальный сайт ЗАО МИДАУС – Режим доступа : <http://www.midaus.com>, свободный.
9. Официальный сайт ПГ МЕТРАН – Режим доступа : <http://www.metran.ru>, свободный.
10. Russia Internet-of-Things Market 2019–2023 Forecast https://www.idc.com/cis/research/published_reports?document=EUR243934519
11. П. Зараменских, И. Артемьев Интернет вещей. Исследование и область применения Изд-во Инфра-М 2021, – 188 с.
12. J. Security for the internet of things: A survey of existing protocols and open research issues / J. Granjal, E. Monteiro, J. Sa Silva // IEEE Communications Surveys Tutorials. – 2015. – Vol. 17, No. 3. – P. 1294-1312.
13. V. Karagiannis, P. Chatzimisios, F. Vazquez-Gallego, and J. Alonso-Zarate, “A survey on application layer protocols for the internet of things,” in *Transaction on IoT and Cloud Computing*, vol. 3, no. 1, 2015, pp. 11-17.
14. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. MohaYammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols and applications,” in *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 4, 2015, pp. 2347-2376.
15. J. Decuir, “Bluetooth 4.0: Low Energy,” 2010, <https://californiaconsultants.org/wp-content/uploads/2014/05/CNSV-1205-Decuir.pdf>, (accessed February 24, 2017).
16. C. Gomez, J. Oller, and J. Paradells, “Overview and evaluation of Bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology,” in *Sensors*, vol. 12, no. 9, 2012, pp. 11734-11753.
17. Zigbee, “Zigbee resource guide,” 2016, http://www.nxtbook.com/nxtbooks/webcom/zigbee_rg2016/#0, (accessed February 24, 2017).
18. N. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp, and O. Hersent, “Lorawan specification,” LoRa Alliance, January 2015, <https://www.loraalliance.org/portals/0/specs/LoRaWAN%20Specification%201R0.pdf>, (accessed February 24, 2017).
19. Poole, “Weightless wireless — m2m white space communications-tutorial,” 2014, <http://www.radioelectronics.com/info/wireless/weightless-m2m-white-space-wireless-communications/basics-overview.php>, (accessed February 24, 2017).
20. EnOcean – The World of Energy Harvesting Wireless Technology,” 2015, <https://www.enocean.com/en/technology/white-papers/>, (accessed February 24, 2017).
21. Михайлов П.Г., Аналиева А.У., Ломтев Е.А. и др. Разработка концепции создания и функционирования системы мониторинга селеопасности в горных и предгорных районах // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль 2016. – № 1. – С. 15-23.

Статья поступила в редакцию 15.09.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 621.3

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0017

РАЗРАБОТКА ШИНЫ ITBUS ПОВЫШЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ НА ФИЗИЧЕСКОМ УРОВНЕ

© 2021

Трубицков Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры "Прикладная информатика"

Ремонтов Андрей Петрович, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой "Прикладная информатика"

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, e-mails: sv_trubitskoi@mail.ru, remontov@mail.ru)

Аннотация. Предложено обоснованное техническое решение физического уровня протокола *ITBUS* (*Infrared Transport Bus*). Разработан ряд важных дополнений стандарта *IrDA FIR*, стандарта передачи данных с использованием направленного полудуплексного последовательного инфракрасного канала. Обоснованы отличия и важные дополнения *ITBUS* на *PHY* – уровне от стандарта *IrDA FIR*. Предложено изменение топологии сети заключающиеся в физическом соединении точка-точка. Поддерживается шинная топология с соединениями типа точка-точка и точка-многоточка. *PHY*-уровень является частью общего стека *ITBUS*, состоящего из уровней: *PHY*, *LAP*, *CMD*. Разработаны детали аппаратно-программной реализации *PHY*-уровня *ITBUS* на ПЛИС и МК. Передача данных посредством последовательного ИК-канала поддерживается на расстоянии (длина оптического линка) до ~ 10 см (зависит от требуемого уровня битовых ошибок *Bit Error Rate*, *BER*), с установлением устойчивого соединения между двумя независимыми узлами (абонентами). Преобразование электрических импульсов в оптические (передача, *TX*) и обратно (прием, *RX*) реализуется с помощью ИК-приемопередатчика. Передача осуществляется путем включения/выключения передающего светодиода ИК-диапазона, прием – путем измерения тока смещения принимающего фотодиода ИК диапазона. Установленное соединение ограничено зоной прямой видимости и чувствительно к чистоте оптической среды между двумя узлами. Канал связи – полудуплексный: в каждый момент времени только один из двух узлов может передавать данные, а другой – принимать.

Ключевые слова: *Infrared Transport Bus* (инфракрасная шина передачи данных); физический уровень протокола передачи данных; задачи управления промышленными объектами.

CALCULATION OF THE ITBUS BUS BANDWIDTH AT THE PHYSICAL LEVEL

© 2021

Trubitskov Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the department of applied informatics

Remontov Andey Petrovich, candidate of technical sciences, associate professor,
head of the department of applied informatics

Penza State Technological University

(Russia, Penza, 440039, Baydukov Pr./Gagarin St., 1a/11, e-mails: sv_trubitskoi@mail.ru, remontov@mail.ru)

Abstract. The technical description of the physical layer of the *ITBUS Protocol* (*Infrared Transport Bus*) and a number of important additions of the *IrDA FIR* standard aiming at data transmission using a targeting half-duplex serial infrared channel are considered in the article. The main points of differences and a number of important *ITBUS* additions at the *PHY* level from the *IrDA FIR* standard are shown. The main difference is in the network topology: in addition to the physical point-to-point connection the bus topology with point-to-point and multipoint connections is supported. The *PHY* level is a part of the total *ITBUS* stack consisting of the following levels: *PHY*, *LAP*, *CMD*. Some specifics of hardware and software implementation of the *ITBUS PHY*-level on the basis of *FPGA* and *MK* are described. Data transmission via a serial *IR* channel is kept at a distance (optical link length) up to ~ 10 cm (it depends on the required *Bit Error Rate*, *BER*) providing a stable connection between two independent nodes (subscribers). The conversion of electrical pulses into optical ones (*TX*, transmission) and vice versa (*RX*, reception) is realized by means of a *T-R* device. The transmission is carried out by turning on/off the transmitting *IR* of the *T-R* device, the reception is carried out by measuring the bias current of the receiving photodiode of the *IR* range. This connection is limited by the line of sight and is sensitive to the purity of the optical medium between two nodes. The communication channel is half – duplex: at any given time, only one of two these nodes can transmit data and the other one can receive it.

Keywords: *Infrared Transport Bus*, physical layer of data transmission protocol, management tasks of industrial facility.

Введение. Решение задачи импортозамещения предполагает локализацию передовых сетевых технологий на базе ведущих отечественных производителей оборудования автоматизированного контроля и управ-

ления для построения АСУ ТП любой сложности. Предложенные технические решения предназначены для программно-технических и измерительно-вычислительных комплексов, промышленных панельных

компьютеров и коммуникационного оборудования.

В практике часто возникают нестандартные задачи, связанные с необходимостью осуществлять управление промышленными объектами, находящимися в неблагоприятных условиях внешнего окружения, что в свою очередь обуславливает необходимость реализации шины передачи данных в нестандартной конфигурации и при условии обеспечения гальванической развязки.

Материалы и результаты исследования. Одним из путей решения данной задачи является использование оптической среды для передачи данных (*Infrared Transport Bus* (инфракрасная шина передачи)) протокола *ITBUS*, предназначенного для передачи данных с использованием направленного полудуплексного последовательного инфракрасного канала физического уровня (*PHY*) на скорости 4 Мбит/с.

Главное отличие и ряд важных дополнений *ITBUS* на *PHY*-уровне от стандарта *IrDA FIR*, проявляется в топологии сети: кроме физического соединения точка-точка, поддерживается шинная топология с соединениями типа точка-точка и точка-многоточка.

В *ITBUS* шина реализована путем использования двух интерфейсов в каждом узле и объединения узлов в единую цепочку, протокол модуляции и демодуляции ИК приемопередатчика и детали аппаратно-программной реализации *PHY*-уровня *ITBUS* выполнены на ПЛИС и МК (рис. 1). Один из двух интерфейсов узла обслуживает часть шины слева от узла, другой – справа от узла. *PHY*-уровень является частью общего стека *ITBUS*, состоящего из уровней: *PHY*, *LAP*, *CMD* (в порядке возрастания иерархии), что повышает мощность интерфейса оптической среды [1-3].

Передача данных посредством последовательного ИК-канала поддерживается на расстоянии (длина оптического линка) до ~ 10 см (зависит от требуемого уровня битовых ошибок *Bit Error Rate*, *BER*), с установлением устойчивого соединения между двумя независимыми узлами (абонентами). Преобразование электрических импульсов в оптические (передача, *TX*) и обратно (прием, *RX*) реализуется с помощью ИК приемопередатчика. Передача осуществляется путем включения/выключения передающего светодиода ИК диапазона, прием – путем измерения тока смещения принимающего фотодиода ИК диапазона. Установленное соединение ограничено зоной прямой видимости и чувствительно к чистоте оптической среды между двумя узлами. Канал связи – полудуплексный: в каждый момент времени только один из двух узлов может передавать данные, а другой – принимать.

В протоколе *ITBUS* используется принятая в стан-

дарте *IrDA FIR* схема модуляции *4PPM*. Согласно *4PPM*, каждые два бита передаваемых данных объединяются в так называемую «битовую пару» (*data bit pair*; *DBP*). Каждой битовой паре ставится во взаимно-однозначное соответствие так называемый «*4PPM*-символ» (*4PPM data symbol*, *DD*). Символ состоит из 4-х «чипов» (*chips*). Только один из 4-х чипов, составляющих символ, содержит оптический импульс (короткая вспышка передающего светодиода ИК-приемопередатчика). Номинальная длительность оптического импульса равна длительности чипа и составляет 125 нс [4-7].

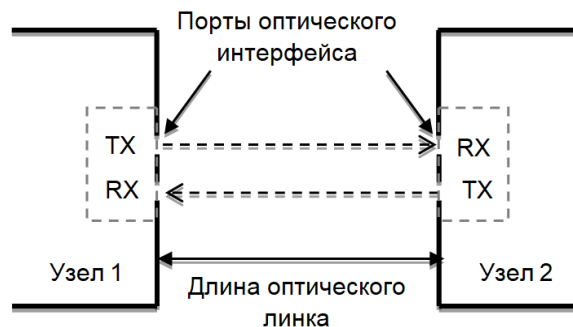


Рисунок 1 – Схема физического соединения точка-точка между двумя узлами *ITBUS*

Чип «1» соответствует оптическому импульсу (передающий светодиод излучает), чип «0» – отсутствию оптического импульса (передающий светодиод выключен). Кодирование данных *DBP*→*DD* для передачи осуществляется побайтно, начиная с младшей битовой пары каждого байта. Каждый кодированный *4PPM*-символ передается в оптический линк, начиная со старшего чипа (табл. 1).

Таблица 1 – Соответствие между битовой парой и *4PPM*-символом

Битовая пара (DBP)	4PPM-символ (DD)
00	1000
01	0100
10	0010
11	0001

ITBUS в отличие от стандарта *IrDA FIR* поддерживает топологию сети «шина» на *PHY*-уровне, в дополнение к базовому соединению точка-точка. Благодаря поддержке шинной топологии сети, реализуются соединения как типа точка-точка, так и типа точка-многоточка между различными узлами сети.

В *ITBUS* шина реализована путем использования двух интерфейсов в каждом узле и объединения узлов в единую цепочку. Один из двух интерфейсов узла обслуживает часть шины слева от узла, другой – справа от узла (рис. 2).

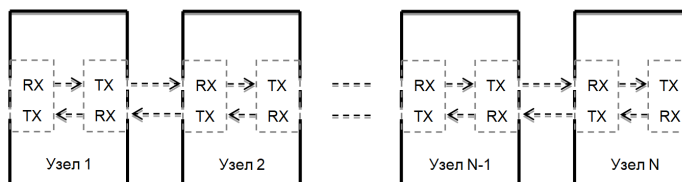


Рисунок 2 – Типичная топология сети *ITBUS*-шина

Шинная топология поддерживается за счет реализации режима «прозрачности», или ретрансляции, узлов. Когда режим прозрачности выключен, только соседние (смежные) узлы сети могут обмениваться данными на PHY-уровне, реализуя соединение точка-точка, как и в стандарте IrDA FIR. Включение режима прозрачности на выбранном узле запускает ретрансляцию принятых данных на PHY-уровне с RX-порта одного интерфейса на TX-порт другого интерфейса внутри этого узла. В результате, на PHY-уровне, каждый узел на шине может принять данные, отправленные другим узлом, при соответствующей конфигурации режима прозрачности на узлах шины.

Данные PHY-уровня передаются в пакетах. Пакет состоит из кадров. Кадры имеют фиксированную длину и формат. Признаком конца пакета является неактивное состояние оптического линка (IDLE, передающий светодиод выключен) в течение времени, равного или превышающего длительность кадра. PHY уровень ITBUS отличается от PHY-уровня IrDA FIR не только разбиением пакета на кадры. В отличие от стандарта IrDA FIR, где синхронизация приема данных PHY-уровня осуществляется только в начале пакета, синхронизация приема в ITBUS производится в начале каждого кадра пакета. Эти отличия обусловлены особенностями аппаратно программной реализации ITBUS [8-10].

Последовательное следование PHY - пакетов ITBUS в оптическом линке

IDLE	Пакет 1	IDLE	Пакет 2	IDLE	Пакет 3	IDLE
------	---------	------	---------	------	---------	------

Пакет состоит из обязательных 4-х кадров стартовой последовательности (S-Кадр 1 ... S-Кадр 4) и опциональных кадров данных (D-Кадр 1 ... D-Кадр N, N ≥ 0).

Формат PHY - пакета ITBUS

Кадры стартовой последовательности				Кадры данных			
S - Кадр 1	S - Кадр 2	S - Кадр 3	S - Кадр 4	D - Кадр 1	...	D - Кадр N-1	D - Кадр N

Формат кадра обусловлен особенностями аппаратно программной реализации ITBUS. Кадр имеет фиксированную длину и состоит из 2 х стартовых битов (STA), 4 х 4PPM-символов данных (DD 0, DD 1, DD 2, DD 3) и 4 х стоповых битов (STO). Один кадр переносит один байт информации.

Формат PHY - кадра ITBUS

Стартовые биты STA		4PPM-символы данных DD #			Стоповые биты STO
10	DD 0	DD 1	DD 2	DD 3	0000

Стартовые биты служат признаком начала кадра. Также по ним выполняется синхронизация приема. Длительность одного бита равна длительности чипа и составляет 125 нс. Бит «1» соответствует оптическому импульсу (передающий светодиод излучает), бит «0» – отсутствию оптического импульса (передающий светодиод выключен).

Совокупность из 4-х 4PPM-символов данных является результатом кодирования одного байта входных данных согласно схеме модуляции 4PPM. Таким образом, суммарная длительность одного кодированного байта данных составляет 16 чипов или 16 x 125

нс = 2000 нс.

Стоповые биты служат признаком конца кадра. Также с их помощью реализуется межкадровое выравнивание. Длительность одного бита равна длительности чипа и составляет 125 нс. На протяжении всех 4-х стоповых битов оптический линк неактивен (передающий светодиод выключен).

Таким образом, суммарная длительность одного кадра равна длительности 22 чипов или 22 x 125 нс = 2750 нс. Так как один кадр переносит один байт информации, далее содержимое кадра будет обозначаться как байт в не кодированном виде.

Стартовая последовательность (S-Кадр 1 ... S-Кадр 4) является обязательной частью пакета и состоит из 4-х кадров. Первые два кадра необходимы для «раскачивания» RX-тракта ИК-приемопередатчика после периода неактивности оптического линка. Их искажение в процессе передачи и приема считается нормальным. Последние два кадра выполняют две функции: идентификация устройства как узла ITBUS, а также проверка схемы модуляции 4PPM.

Кадры данных (D-Кадр 1 ... D-Кадр N, N ≥ 0) не являются обязательной частью пакета. Каждый кадр переносит один байт данных.

Пропускной способностью шины ITBUS будем считать максимальную скорость передачи информации между какими-либо двумя узлами шины при отсутствии ошибок передачи. При этом будем отличать номинальную скорость – битовую скорость передачи данных без различия служебных и пользовательских данных, и эффективную скорость – скорость передачи пользовательских данных (полезной нагрузки).

Заключение. Номинальная скорость равна скорости передачи данных через UART – 4 Мбит/с, поскольку на всем пути следования данных, от передающего узла до принимающего, сужение пропускной способности не предусмотрено протоколом ITBUS [11].

Эффективная скорость зависит от формата (упаковки) полезной части передаваемых данных. Будем считать, что пакеты следуют один за другим с минимальной паузой, равной длительности кадра ITBUS, 2750 нс. Количество кадров в одном пакете практически неограниченно, поскольку синхронизация покадровая. Поэтому, в целях подсчета эффективной скорости будем предполагать, что количество кадров в пакете бесконечно велико. Следовательно, паузой между пакетами можно пренебречь. По той же причине можно пренебречь первыми четырьмя кадрами пакета – кадрами стартовой последовательности. Каждый кадр данных переносит 1 Байт полезной информации PHY-уровня. Длительность одного кадра равна 2750 нс. Отсюда получаем эффективную скорость передачи на PHY-уровне ITBUS:

$$R = \frac{1B}{2750 \text{ ns}} = \frac{8 \text{ bit}}{2.75 \text{ us}} = 2.91 \text{ MBit/s.}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Трубицков С.В., Ремонтов А.П., Ветлугина Г.П. Аппаратно-программная реализации PHY - уровня шины ITBUS.

XVI Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2018)». Санкт-Петербург, 24-26 октября 2018 г.: Материалы конференции. \ СПОИСУ. – СПб, 2018. – 631 с. С. 298 – 299. ISBN 978-5-907050-44-0.

2. Likhtsinder B. Y., Bakai Y. O. Wireless sensor network technologies //Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. – 2021. – Т. 29. – №. 1. – С. 92-103.

3. Lonca G. et al. Does material circularity rhyme with environmental efficiency? Case studies on used tires //Journal of Cleaner Production. – 2018. – Т. 183. – С. 424-435.

4. Абидарова А. А. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ И ИХ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОТОКОЛОВ IRDA //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – №. 5. – С. 285-289.

5. IEEE 802.15.4-2020. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (дата обращения: 18.12.2020).

6. IEEE 802.15.1-2005. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_1-2005.html (дата обращения: 18.12.2020).

7. IEEE 802.16. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_16-2009.html (дата обращения: 18.12.2020).

8. ITU-T Y.4104/F.744: Service description and requirements for ubiquitous sensor network middleware. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-F.744-200912-I!!PDFE&type=items (дата обращения: 18.12.2020).

9. ITU-T Y.4251/F.747.1: Capabilities of ubiquitous sensor networks for supporting the requirements of smart metering services. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-F.747.1-201206-I!!PDF-E&type=items

10. ITU-T Y.4403/Y.2026: Functional requirements and architecture of the next generation network for support of ubiquitous sensor network applications and services. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2026-201207-I!!PDF-R&type=items.

10. IrDA Library of Specifications and Technical Papers for EMF. URL: <https://www.irda.org/library-ofspecs> (дата обращения: 18.12.2020).

11. Отчет НИР (НИОКР) «Расчет пропускной способности шины ITBUS на физическом уровне» №5/05-05-18 на выполнение от 20.06.2018г.

Статья поступила в редакцию 08.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 004.094

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0018

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВИРТУАЛЬНОМ ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ

© 2021

Обухов Артем Дмитриевич, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»

Майстренко Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», директор Института заочного обучения

Патутин Кирилл Игоревич, студент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»

Вехтева Надежда Андреевна, магистрант

кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»

Тамбовский государственный технологический университет

(392000, Россия, Тамбов, ул. Советская, 106,

e-mails: Obuhov.art@gmail.com, kirill-patutin@mail.ru, magician.loner@yandex.ru)

Аннотация. В статье приведен краткий обзор по исследованиям в области разработки виртуальных лабораторных стендов, которые доказали высокую актуальность в современных образовательных системах, функционирующих на основе виртуальной реальности. Данная технология позволяет качественно улучшить процесс подготовки студентов, особенно в условиях дистанционного обучения. В работе рассматривается задача математического моделирования и визуализации гидродинамических процессов в виртуальном лабораторном стенде для подготовки специалистов в нефтегазовой отрасли. Предложена упрощенная математическая модель, позволяющая корректно отобразить в виртуальном пространстве требуемые гидродинамические процессы без необходимости сложных аналитических расчетов, что позволило достигнуть высокой производительности. Модель формализована в нотации теории множеств, что в дальнейшем упрощает ее перенос в программное обеспечение и структуру баз данных. На основе математической модели реализовано и внедрено программное обеспечение для подготовки специалистов нефтегазовой отрасли. Разработанный виртуальный стенд позволяет обучающимся исследовать гидродинамические процессы в виртуальной реальности с высокой степенью достоверности. Предложенные подходы к упрощению физических или химических процессов могут быть использованы для реализации широкого набора виртуальных лабораторных стендов, так как позволяют визуализировать данные процессы на различном оборудовании.

Ключевые слова: виртуальный лабораторный стенд, дистанционное образование, трехмерное моделирование, виртуальная реальность, визуализация физических процессов.

MATHEMATICAL MODELING AND VISUALIZATION OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN A VIRTUAL LABORATORY STAND

© 2021

Obukhov Artem Dmitrievich, candidate of technical sciences,

associate professor of the department of automated decision support systems

Maystrenko Natalia Vladimirovna, candidate of technical sciences, associate professor of the department of Automated decision support systems, director of the institute of distance learning

Patutin Kirill Igorevich, student of the department of automated decision support systems

Vekheteva Nadezhda Andreevna, master's student of the department of automated decision support systems

Tambov State Technological University

(392000, Russia, Tambov, Soviet street, 106,

e-mail: Obuhov.art@gmail.com, kirill-patutin@mail.ru, magician.loner@yandex.ru)

Abstract. The article provides a brief overview of research in the development of virtual laboratory stands, which have proven to be highly relevant in modern educational systems operating on the basis of virtual reality. This technology makes it possible to qualitatively improve the process of training students, especially in the context of distance learning. The paper considers the problem of mathematical modeling and visualization of hydrodynamic processes in a virtual laboratory bench for training specialists in the oil and gas industry. A simplified mathematical model is proposed that allows to correctly display the required hydrodynamic processes in virtual space without the need for complex analytical calculations, which made it possible to achieve high productivity. The model is formalized in set theory notation, which further simplifies its transfer to software and database structures. On the basis of a mathematical model, software for the training of specialists in the oil and gas industry has been implemented and implemented. The developed virtual stand allows students to explore hydrodynamic processes in virtual reality with a high degree of reliability. The proposed approaches to simplifying physical or chemical processes can be used to implement a wide range of virtual laboratory stands, since they allow visualizing these processes on various equipment.

Keywords: virtual laboratory bench, distance education, 3D modeling, virtual reality, visualization of physical processes.

Введение. Процесс подготовки специалистов нефтегазовой отрасли включает как теоретический курс, так и комплекс практических упражнений. Для выработки необходимого уровня сформированности практических навыков и компетенций у специалиста в этой области необходимо проведение большего количества лабораторных занятий и получение опыта работы с оборудованием. Однако из-за ограничений, вызванных различными причинами (пандемия, дистанционное обучение, отсутствие материальной возможности проведения экспериментов или их высокая опасность для обучающихся и других), организовать практические занятия в полном объеме и на достаточном уровне не всегда возможно. Одним из вариантов решения этой актуальной проблемы является использование виртуальных лабораторий и платформ, на базе которых осуществляется подготовка специалистов [1].

В предметной области нефтегазовой отрасли при проведении практических занятий необходимо изучение множества сложнейших химических и физических процессов и явлений. В ходе образовательного процесса для лучшего понимания закономерностей, протекающих в этой области, студенты знакомятся с математическими моделями данных процессов. Однако полный перенос таких моделей в область виртуального пространства зачастую не имеет смысла из-за высокой сложности математических уравнений и, следовательно, высокой стоимости и сложности программной реализации таких обучающих систем [2-4].

Поэтому в качестве основы реализации виртуальных платформ для проведения лабораторных и практических занятий используются упрощенные математические модели, обеспечивающие требуемый уровень реалистичности и соответствия реальным процессам.

В работе рассматривается задача реализации виртуальной платформы для подготовки специалистов нефтегазовой отрасли. Виртуальная платформа реализуется на примере лабораторной установки исследования гидродинамических процессов [5]. В ходе исследования выявлены следующие проблемы: высокая сложность моделирования гидродинамического процесса, высокая стоимость реальных лабораторных установок, необходимость в большом объеме помещения для проведения групповых занятий. Для решения обозначенных проблем и реализации виртуальной платформы для подготовки специалистов нефтегазовой отрасли необходимо: разработать упрощенную математическую модель, основанную на аппроксимации экспериментальных данных, реализовать ее в виртуальной платформе, разработать виртуальную среду платформы, апробировать платформу в образовательном процессе при подготовке специалистов нефтегазовой отрасли.

Цель исследования – осуществить формализацию процессов предметной области [6], моделирование и практическую реализацию гидродинамических процессов в виртуальной среде (в рамках данного исследования - процессы перекачивания жидкости насоса-

ми при различном способе их подключения).

Существующие подходы к моделированию гидродинамических процессов [7-8] отличаются высокой сложностью, трудоемкость их реализации в виртуальной среде не оправдана, так как упрощенная модель позволяет визуализировать эти процессы для пользователя с такой же достоверностью и реалистичностью, но большей производительностью.

Поэтому в рамках данного исследования поставлена следующая задача – разработать математическое обеспечение процессов перекачивания жидкости насосами при различном способе их подключения для виртуальной установки, путем анализа и обработки экспериментальных данных, полученных с реальной установки [9]. Упрощенная математическая модель должна использоваться в виртуальной установке для корректного расчета необходимых выходных параметров на всей области определения входных параметров с достаточной точностью и отличаться простотой реализации.

Материалы и результаты исследования. На первом этапе исследования проанализируем реальную лабораторную установку и те физические процессы, что в ней протекают.

В лабораторном стенде реализованы гидродинамические процессы перемещения жидкости по трубам через насосы, которые подключены как последовательно, так и параллельно, дополнительно подключен бак, в котором под давлением воздуха жидкость, выкачанная с помощью насосов, занимает определенный уровень. Также присутствует бак с жидкостью, откуда вода начинает циркулировать и куда она возвращается [10].

Лабораторная работа состоит в моделировании гидродинамического процесса, который описывает уравнение Навье-Стокса.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \Delta v = \frac{F - 1}{p \Delta p + \eta \Delta \eta},$$

где v – скорость частицы жидкости, t – время, F – внешняя удельная (приходящаяся на единицу массы)

сила, p – давление, $\eta = \frac{\mu}{\rho}$ – кинематический коэффициент вязкости (μ – динамический коэффициент вязкости), ∇ – оператор Гамильтона, Δ – оператор Лапласа. Коэффициенты вязкости зависят от температуры и для жидкости, как правило, определяются экспериментально, а для газа выводятся из кинетической теории газов [11-12].

Из-за сложности и неоправданной трудоемкости реализации в рамках виртуальной установки уравнений Навье-Стокса было принято решение собрать данные экспериментально и построить на их основе упрощенную математическую модель [13-15]. Полученные в ходе нескольких попыток данные усреднены, а закономерности между входными и выходными параметрами занесены в таблицы.

Рассмотрим формализованную математическую модель процессов виртуальной установки.

К входным параметрам данного процесса относят-

ся:

$$X = \{x, E, m\},$$

где $x = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$ – положение клапанов, которые принимают значение 1 и 0, то есть, открыт или закрыт клапан. При более точном варианте стенда и его больших масштабах вентили принимают положение в процентном соотношении, то есть 0% – вентиль полностью открыт, а 100 % – он полностью закрыт;

$E = \{e_1, e_2, e_3\}$ – насосы, которые также могут принимать два значения 0 и 1. Все насосы могут работать в паре, образуя различные сочетания $\{e_1, e_2\}$, $\{e_1, e_3\}$, $\{e_2, e_3\}$, $\{e_1, e_2, e_3\}$ и по этой причине вход E принимает следующий вид: $E = \{\{e_1\}, \dots, \{e_3\}, \{e_1, e_2\}, \dots, \{e_2, e_3\}, \{e_1, e_2, e_3\}\}$.

Тогда выделим 7 подмножеств: $E = \{E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7\} = \{Ei | i = 1 \dots 7\}$;

$m = \{m_1, m_2, m_3\}$ – мощность насоса и чем она выше, тем насос лучше прокачивает жидкость по трубам. Мощность каждого насоса подразделяется на три режима: $m_1 = \{m_{11}, m_{12}, m_{13}\}$, $m_2 = \{m_{21}, m_{22}, m_{23}\}$ и $m_3 = \{m_{31}, m_{32}, m_{33}\}$.

К выходным параметрам относятся:

$$Y = \{P, R\},$$

где P – множество давлений, снимаемых датчиками с трех мест в установке в кПа

R – множество значений расхода в литрах/минуту.

Далее рассчитывается система из двух функций $S(X)$ и $S2(X)$, которые представляют функции заданные табличным способом, полученные различными методами аппроксимации (полином, кубический сплайн, нейронная сеть и так далее):

$$\begin{cases} S(X) = P, \\ S2(X) = R. \end{cases}$$

На основе функций (9) можно реализовать математическую модель лабораторной установки для её реализации в программной среде виртуальной платформы. Рассмотрим процедуру получения каждой из функций.

Функция $S(X)$ является произведением двух функций $\varphi(X)$ и $F(X)$:

$$S(X) = \varphi(X) F(E),$$

где функция $\varphi(X)$ представляет логическую функцию ошибки, то есть если какой-то из входов закрыт, а так быть не должно, то функция выдаст 0 и тогда вся функция $S(X)$ станет равна нулю и программа предупредит нас о неправильной настройке начальных условий. Сама функция $\varphi(X)$ выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi(X) &= (x_4 \oplus (x_6 \rightarrow x_5)) \wedge \\ &\wedge ((x_2 \wedge P_1 \wedge XOR(m_{11}, m_{12}, m_{13})) | \\ &|(x_1 \wedge P_2 \wedge XOR(m_{21}, m_{22}, m_{23})) | \\ &|(-x_3 \wedge P_3 \wedge XOR(m_{31}, m_{32}, m_{33}))) \end{aligned}$$

где $F(E_i) = P_{i,a,b,c}$ $P_{i,a,b,c} \in P$ – функция, которая осуществляет выбор значений давлений из таблицы экспериментальных данных. Индексы i, a, b, c определяют координаты ячейки в этой многомерной матрице давлений:

i – определяет режим работы насоса;

a – индекс таблицы P , принимающий значение от 1 до 3 в случае, если $|E_i| = 1$, иначе $a = 1$;

b – индекс таблицы P , принимающий значение от 1 до 3 в случае, если $|E_i| = 2$, иначе $b = 1$;

c – индекс таблицы P , принимающий значение от 1 до 3 в случае, если $|E_i| = 3$, иначе $c = 1$.

Значения, которые принимают индексы i, a, b, c зависят от индексов элементов множества мощностей насосов следующим образом:

если $|E_i| = 1, \exists m_j$, то $j \rightarrow a$,

если $|E_i| = 2, \exists m_j, m_{k^p}$, то $(j, l) \rightarrow b$,

если $|E_i| = 3, \exists m_j, m_{k^p}, m_{w^v}$, то $(j, l, w) \rightarrow c$.

Аналогично вычисляется выход R :

$$S2(X) = \varphi(X) F2(X),$$

$$F2(X) = r_{a,b,c}.$$

Разница лишь в том, что используется таблица с иной размерностью и индексами a, b, c .

Собранные экспериментальные данные и полученные на их основе зависимости в виде аппроксимирующих функций применяются в программной реализации виртуального стенда на основе 3D модели (рис. 1). Данная реализация исполнена в программной среде *Unity*. В ней имеются все необходимые функции, которые требуются для разработки приложений на основе трехмерных объектов и виртуального мира. Основными преимуществами платформы является кроссплатформенность, визуальная среда разработки, модульная система компонентов [16-18]. Это позволяет использовать разработанный проект на различных платформах (персональных компьютерах, планшетах, смартфонах), что особенно важно при организации образовательного процесса для расширения потенциальной аудитории пользователей. Реализованная в рамках виртуальной установки упрощенная математическая модель при этом не приводит к снижению производительности работы системы, что позволяет использовать ее на всех перечисленных платформах.

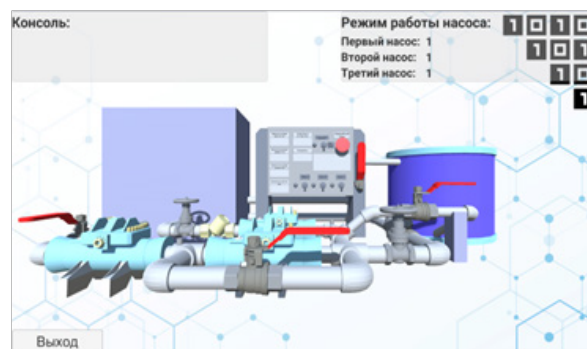


Рисунок 1 – 3D модель виртуального стенда

Трехмерные объекты были созданы в профессиональном программном обеспечении для 3D-моделирования *3ds Max* с использованием встроенных в него инструментов моделирования [19-20].

Заключение. Так как процесс пандемии негативно повлиял на образовательный процесс, у множества школ и университетов возникла потребность в проведении лабораторных работ без использования учебных стендов и очного присутствия обучающихся. В таком

случае требуется перенос этих явлений в виртуальный мир, где от пользователя требуется лишь наличие персонального компьютера. Использование виртуальных платформ также решает ряд вопросов, связанных с техникой безопасности, в ряде химических и физических экспериментов. Формат виртуальных платформ для лабораторных и практических занятий позволяет выполнять учебные задания в дистанционном формате с привлечением большого количества обучающихся. Однако создание таких виртуальных платформ сопряжено с рядом нетривиальных задач, одна из которых – математическое моделирование процессов, протекающих в лабораторных установках.

Решение данной проблемы – создание упрощенной математической модели, которая уменьшает время и сложность программной реализации виртуальной установки, снижает нагрузку на систему, позволяя программным средствам высвободить ресурсы на другие задачи. Рассмотрена реализация упрощенной математической модели, которая построена на основе аппроксимации табличных значений экспериментальных данных. Создание такой математической модели позволяет переносить различные физические или химические процессы в виртуальную среду. Разработанное на основе данной модели программное обеспечение позволило с высокой достоверностью моделировать необходимые гидродинамические процессы без серьезного влияния на производительность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Иванов, А.Ф. Модель непрерывной профессиональной подготовки кадров для нефтегазовой отрасли на основе сочетания традиционных и информационных технологий в условиях регионального вуза / А.Ф. Иванов // Международный научный журнал "Инновационная наука". - 2015. - № 6. - С. 212-213.
2. Горобец, С.Н. Использование виртуальных лабораторий при изучении химических дисциплин / С.Н. Горобец // Достижения вузовской науки. - 2014. - № 13. - С. 41-45.
3. Смолин, А.А. Системы виртуальной, дополненной и смешанной реальности / А.А. Смолин, Д.Д. Жданов, И.С. Потемин, А.В. Меженин, В.А. Богатырев // Учебное пособие. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО. – 2018. - 59 с.
4. Савкина, А. В. Виртуальные лаборатории в дистанционном обучении / А. В. Савкина, С. А. Федосин // Образовательные технологии и общество. - 2014. - Т. 17. - № 4. - С. 507-517.
5. Обухов, А. Д. Разработка системы визуализации виртуальной установки для подготовки специалистов нефтегазовой отрасли / Обухов А. Д., Чеботов Н. А., Вехтева Н. А., Патутин К. И., Прокудина Н. Н. // Вестник ТГТУ. - 2020. - Т. 26. - № 4. - С. 571-580.
6. Лагоха, А.С. Формализация предметной области как базовый элемент реализации IT-проектов: учебно-методическое пособие / А.С. Лагоха // Барнаул : АлтГПУ. - 2019. - 46 с.
7. Гладков, Е.А. Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа: учебное пособие / Е.А. Гладков // Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. - 2012. - 99 с.
8. Кудинов, В. А. Гидравлика: учебник и практикум для среднего профессионального образования / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, А. Г. Коваленко, И. В. Кудинов // под ред. Кудинова В. А. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт. - 2019. - 386 с.
9. Земенков, Ю.Д. Эксплуатация насосно-силового оборудования на объектах трубопроводного транспорта / Ю.Д. Земенков, Ю.В. Богатенков, А.Н. Гульков, М.Ю. Земенкова, и др. // Учебное пособие под общей ред. Земенкова Ю. Д. Тюмень: ТюмГНГУ. - 2010. - 456с. - ISBN 978-5-9961-0260-0.
10. Мазо, А.Б. Гидродинамика: учебное пособие для студентов нематематических факультетов / А.Б. Мазо, К.А. Поташев // Казань: Казан. ун-т. - 2013. - 2-е изд. - 128 с.

11. Хорин, А. Н. Семейство точных решений уравнений Навье–Стокса для верификации компьютерных программ / А. Н. Хорин // Информатика и управление, Труды МФТИ., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). - 2020. - Т. 12. - № 4. - С. 80-89.
12. Колесниченко, В.И. Введение в механику несжимаемой жидкости: учебное пособие / В.И. Колесниченко, А.Н. Шарифуллин // Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - 2019. - 127 с. - ISBN 978-5-398-02185-1.
13. Литовка, Ю.В. Получение оптимальных проектных решений и их анализ с использованием математических моделей: учебное пособие / Ю.В. Литовка // Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. - 2006. - 160 с. - ISBN 5-8265-0540-0.
14. Умнов, А.Е. Методы математического моделирования: учебное пособие / А.Е. Умнов // М.: МФТИ. - 2012. - 295 с. - ISBN 5-7417-0189-2.
15. Кравцов, А.В. Системный анализ химико-технологических процессов: учебное пособие / А.В. Кравцов, Э.Д. Иванчина, Е.Н. Ивашкина, Е.С. Шарова // Томск: Изд-во Томского политехнического университета. - 2008. - 96 с.
16. Хоккинг, Джозеф. Unity в действии. Мультиплатформенная разработка на C# / Джозеф Хоккинг // 2-е между. изд. – СПб.: Питер. - 2019. - 352 с.: ил. – (Серия «Для профессионалов»). - ISBN 978-5-4461-0816-9.
17. Линовес, Джонатан. Виртуальная реальность в Unity. / Джонатан Линовес // Пер. с англ. Рагимов Р. Н. – М.: ДМК Пресс. - 2016. - 316 с.: ил. ISBN 978-5-97060-234-8.
18. Ларкович, С.Н. Справочник UNITY. Кратко быстро под рукой. / С.Н. Ларкович // Справочник; Наука и техника. - 2020 г. - 288 с. - ISBN 978-5-94387-667-7.
19. Горелик, А. Г. Самоучитель 3ds Max 2018 / А. Г. Горелик // Самоучитель. СПб.: БХВ-Петербург. - 2018.- 528 с. - ISBN 978-5-9775-3941-8.
20. Гушина, О.М. Компьютерная графика и мультимедиа технологии: электронное учебно-методическое пособие / О.М. Гушина, Н.Н. Казаченок // Тольятти : Изд-во ТГУ. - 2018. - 364 с. - ISBN: 978-5-8259-1185-4.

**Работа выполнена при поддержке лаборатории
медицинских VR тренажерных систем для обучения,
диагностики и реабилитации**

Статья поступила в редакцию 12.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 681.586

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0019

КОНТРОЛЬ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТУРБОАГРЕГАТОВ

©2021

Иванова Яна Александровна, аспирант кафедры радиотехники

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе 34, e-mail: ivanova.yaa@ssau.ru)

Аннотация. В статье рассмотрены виды колебаний роторных систем в процессе работы турбоагрегата, обусловленные воздействием аэродинамических сил или сменой режимов работы. Крутильные колебания приводят к возникновению дополнительных динамических нагрузок и напряжений, которые в свою очередь снижают надежность и служат причиной аварийных повреждений элементов турбомашин, поэтому данные колебания представляют наибольший интерес. В данной статье предложена структурная схема автодинного преобразователя на диоде Ганна, позволяющая по параметрам выходного сигнала оценить характеристики крутильных колебаний вращающихся элементов турбомашин и сделан вывод о необходимости изучения влияния расположения датчика относительно оси вращения ротора, а также изучения влияния параметров отражающей поверхности.

Ключевые слова: крутильные колебания ротора, бесконтактный контроль, радиоволновый датчик, автодинный эффект, доплеровское смещение частоты, динамическая нагрузка, тензометрирование, торсиографы, диод Ганна.

TORSIONAL VIBRATION CONTROL OF ROTATING ELEMENTS OF TURBINE UNITS

©2021

Ivanova Yana Aleksandrovna, department of radio engineering, postgraduate

Samara National Research University named after academician S.P. Koroleva

(443086, Samara, Moskovskoye shosse, 34, e-mail: ivanova.yaa@ssau.ru)

Abstract. The article considers types of rotor systems oscillations in the process of turbine unit operation, caused by the influence of aerodynamic forces or change of operation modes. Torsional vibrations lead to the appearance of additional dynamic loads and stresses, which in turn reduce the reliability and cause emergency damage to elements of the turbomachine, so these vibrations are of greatest interest. In this article we propose the structural diagram of the autodyne converter on the Gann diode, which allows to estimate the characteristics of torsional oscillations of rotating elements of a turbomachine by the parameters of an output signal and the conclusion about necessity of studying influence of location of the transducer relative to the rotor rotation axis, and studying influence of parameters of the reflecting surface is made.

Keywords: rotor torsional oscillations, non-contact control, radio-wave sensor, autodyne effect, Doppler frequency shift, dynamic load, strain gauge, toriographs, Gunn diode.

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется контролю параметров вращающихся узлов турбоагрегатов с целью увеличения длительности безотказной работы и повышения надежности. Во время работы турбомашин вращающиеся элементы совершают как вращательное движение, обусловленное работой системы и представляющее собой движение относительно оси вращения, так и колебательное, обусловленное воздействием аэродинамических сил или сменой режимов работы. По виду деформаций при колебательном движении различают продольные, изгибные, крутильные и сложные (связанные) колебания. При связанных колебаниях в зависимости от величины жесткостей системы в различных направлениях могут возникать одновременно несколько видов колебаний [1]. Крутильные колебания представляют собой неравномерное изменение угловой скорости вращающегося элемента: ускорение или замедление вращения элемента. Такие колебания приводят к возникновению дополнительных динамических нагрузок и напряжений, которые в свою очередь снижают надежность и служат причиной аварийных повреждений элементов турбомашин.

Большой интерес крутильные колебания представляют в области судостроения, так как при проектировании судовых установок необходимо проводить расчеты и замеры крутильных колебаний в соответствии с правилами Российского морского регистра судоходства в виду неравномерной нагрузки различных участков линии валопровода [2-5]. Также в последнее время активно развиваются методы исследования крутильных колебаний роторных систем. Крутильные колебания ротора возникают в процессе работы турбины и снижают длительность безотказной работы, поэтому контроль крутильных колебаний ротора является актуальным вопросом в области повышения надежности работы турбомашин. В области контроля вращающихся элементов турбомашин работы направлены на исследование крутильных колебаний лопаток с целью контроля деформационных состояний [6-9], а также крутильных колебаний роторов с целью предотвращения возникновения усталостных трещин [10, 11].

Для контроля крутильных колебаний вращающихся элементов турбомашин используются как контактные, так и бесконтактные методы. К контактными

методам относится тензометрирование и торсиографирование. Торсиографы фиксируют амплитуду колебаний в некотором сечении вала с помощью емкостного, тензометрического или других датчиков, значения амплитуд выходного сигнала которых преобразуются в электрический сигнал и отображаются в виде торсиограмм и спектрограмм [12]. Тензометрирование предполагает измерение амплитуды скручивания с помощью тензометрических датчиков, наклеенных на элементы вращающихся узлов, и широко применяется для экспериментального определения переменных напряжений в лопатках, дисках рабочих колес и роторах компрессоров и турбин на работающих двигателях в условиях близких к эксплуатационным [13]. Однако, в настоящее время большое распространение получили бесконтактные методы измерения, позволяющие проводить контроль без контакта с вращающимся элементом. Бесконтактный контроль параметров крутильных колебаний роторов может быть осуществлен емкостными, индукционными, вихретоковыми, радиоволновыми и оптоэлектронными преобразователями. В сложных трактах турбомашин наиболее оптимальным является использование оптоэлектронных и радиоволновых датчиков [14]. Однако оптоэлектронные датчики имеют недостатки в виде быстрого загрязнения оптически активной поверхности, в виду этого при организации длительного контроля параметров крутильных колебаний преимущество имеют радиоволновые датчики.

Целью данной работы является разработка структурной схемы преобразователя крутильных колебаний вращающихся элементов турбомашин в условиях высоких температур и загрязнений поверхностей, а также оценка влияния параметров поверхности вращающихся элементов турбомашин на отраженный поток излучения.

Материалы и результаты исследования. Наиболее простую конструкцию, компактность, надежность и чувствительность к воздействию отраженного излучения имеют автодинные радиоволновые датчики, обеспечивающие одновременно функции источника и приемника излучения на основе автодинного преобразователя. Принцип работы таких датчиков основан на автодинном эффекте, представляющим собой изменение параметров автоколебаний генератора под воздействием излучения, отраженного от объекта [15]. Наиболее широко применяемыми являются автодины на диодах Ганна, так как они характеризуются сравнительно низким уровнем шума, малыми габаритами, простотой конструкции и высоким коэффициентом усиления сигнала [16, 17]. Преобразователи на диоде Ганна являются одновременно источником излучения, приемником отраженного излучения и смесителем излученного и отраженного сигналов, причем выходной сигнал преобразователя формируется с доплеровским приращением частоты (1):

$$f_{д} = \frac{2V_{вр}}{\lambda} \cos(\alpha) = \frac{2V_{вр}v}{c} \cos(\alpha), \quad (1)$$

где $V_{вр}$ – скорость окружного движения внешних элементов ротора, обусловленная его вращательным движением;

v – частота излучения генератора;

c – скорость распространения электромагнитного излучения;

α – угол между осью диаграммы направленности датчика и направлением движения ротора;

λ – длина волны излучения.

Формула (1) определяет частоту выходного сигнала, обусловленную только вращательным движением ротора. При возникновении крутильных колебаний, изменяющих мгновенную скорость вращения ротора, частота выходного сигнала изменяется и описывается формулой (2) [18]:

$$f_{д} = \frac{2v(V_{вр} + V_{кр})}{c} \cos(\alpha) = f_{д\text{вр}} + f_{д\text{кр}}, \quad (2)$$

где $f_{д\text{вр}}$ – составляющая частоты Доплера, обусловленная вращательным движением;

$f_{д\text{кр}}$ – составляющая частоты Доплера, обусловленная колебательным движением (крутильными колебаниями).

Величина угла α между осью диаграммы направленности датчика и направлением движения ротора определяет расположение датчика относительно ротора и влияет на точность преобразования. На рисунке 1 приведена предлагаемая структурная схема автодинного преобразователя на диоде Ганна, позволяющая по параметрам выходного сигнала оценить характеристики крутильных колебаний вращающихся элементов турбомашин.

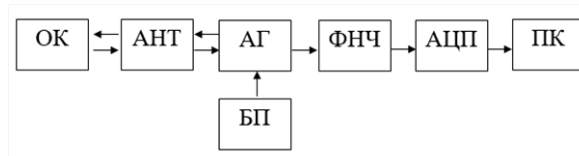


Рисунок 1 – Структурная схема преобразователя (ОК – объект контроля, АНТ – антенна, АГ – автодинный генератор, ФНЧ – фильтр нижних частот, БП – блок питания, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПК – портативный компьютер)

На неподвижной части турбомашин устанавливается бесконтактный радиоволновый преобразователь и регистрируется сигнал, полученный в результате отражения излученного сигнала от поверхности вращающегося элемента, являющегося объектом контроля. Далее автодинная система формирует сигнал доплеровской частоты с низкочастотными спектральными компонентами, соответствующими крутильным колебаниям, которые выделяются фильтром низких частот и с помощью АЦП преобразуется в цифровой сигнал, который после обработки на ПК отображается на экране в виде характеристик, определяющих параметры крутильных колебаний.

При падении потока радиоволнового излучения на совершенно ровную плоскую поверхность направление отражения волны подчиняется закону геометрической оптики и называется зеркальным. При

этом угол падения равен углу отражения. Однако поверхность вращающегося элемента турбоагрегата не является абсолютно плоской и имеет шероховатости, обусловленные технологическими особенностями изготовления. Тогда отражение от поверхности объекта контроля является направленно-диффузным. Для пренебрежения шероховатостью поверхности объекта контроля используется критерий Релея, описывающий соотношение длины волны и высоты шероховатости поверхности объекта контроля (3):

$$h < \frac{\lambda}{8 \sin \alpha_0}, \quad (3)$$

где h – высота шероховатости поверхности;

λ – длина падающей радиоволны;

α_0 – угол падения радиоволны λ .

При расположении излучающей поверхности датчика крутильных колебаний перпендикулярно оси вращения ротора угол падения радиоволны составляет 90° , тогда соотношение (3) приводится к виду $\lambda > 8h$ [19]. Таким образом, при длине волны падающего излучения в восемь раз большей высоты микронеровности падающий поток можно считать отраженным зеркально при падении излучающего потока перпендикулярно отражающей поверхности. В случае, если длина волны меньше величины $8h$, то отраженное излучение рассеивается диффузно, то есть равномерно во всех направлениях. Индикатриса рассеяния абсолютно диффузного отражения представляет собой круг, ось которого совпадает с нормалью, восстановленной из точки падения.

При падении излученного потока на отражающую поверхность при величине угла $\alpha_0 \neq 90^\circ$, величина отклонения индикатрисы рассеяния от нормали, восстановленной из точки падения определяется величиной $a = \sin \alpha_0$. Коэффициент неидеальности отражения при абсолютно диффузном отражении тогда описывается функцией (4):

$$K(\alpha) = f\left(\frac{h}{\lambda}\right), \quad (4)$$

А для зеркального отражения коэффициент неидеальности отражения описывается формулой (5):

$$K(\alpha) = 1 - f\left(\frac{h}{\lambda}\right), \quad (5)$$

Представленная на рисунке 2 кривая позволяет оценить неидеальность отражения для различных видов отражения излучения от поверхности: от зеркального отражения до абсолютно диффузного.

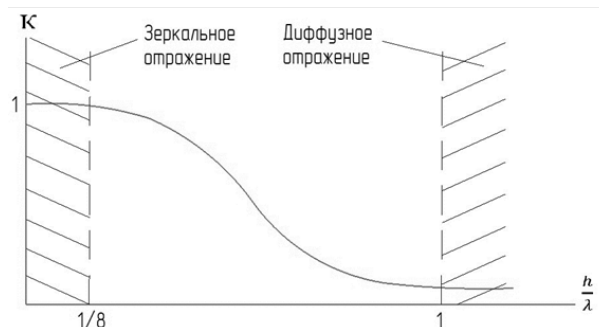


Рисунок 2 – Кривая коэффициента неидеальности отражения излучения от поверхности

Также в работе [20] было экспериментально установлено, что использование радиоволновых источников представляется возможным для исследования характеристик отражающей поверхности с помощью оценки параметров сигнала, отраженного от поверхности. При этом необходимо учитывать технологические особенности отражающей поверхности, что определяет выбор элементной базы. Отражающая поверхность в этом случае представляет собой набор дискретных прямоугольных площадок со сторонами a, b . Размеры площадки определяются шириной диаграммы направленности антенны.

Заключение. Таким образом, доплеровский автодинный СВЧ-преобразователь является оптимальным решением при проектировании бесконтактных преобразователей крутильных колебаний вращающихся элементов турбомашин и исследовании влияния крутильных колебаний на работу вращающихся узлов турбоагрегатов в виду их высокой точности преобразования, устойчивости к высоким температурам и загрязнению внутреннего тракта турбомашин. Влияние расположения датчика относительно оси вращения ротора, а также влияние параметров отражающей поверхности на выходной сигнал преобразователя являются исследовательскими задачами при проектировании преобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Паровой Ф.В., Лёжин Д.С., Ржевский В.П., Мелентьев В.С., Гвоздев А.С. Исследование крутильных колебаний валов: уч. пособие // Самара, Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – 40 с.
2. Лапин Ю.А., Герман А.П., Бурлакова Н.Н. Анализ методов расчета крутильных колебаний судовых валопроводов // Вестник ИШ ДВФУ. – 2020. – №3 (44). – С. 71-79. URL: <https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/3-44/7/>. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-3-7
3. Сергеев К.О., Кудрявцев М.В. Выбор параметров преобразования при дискретном измерении крутильных колебаний валов судовых энергетических установок // Вестник МГТУ. – 2013. – Т. 16. – № 1. – С. 171-175. URL: http://vestnik.mstu.edu.ru/v16_1_n51/171_175_serge.pdf
4. Покусаев М. Н., Овсянников М.К., Сибряев К.О. Анализ характеристик крутильных колебаний в гребном вале судов класса «Река-море» // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2014. – №3 (25). – С.32-42. URL: <https://journal.gumrf.ru/article/25/32-42>. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-3-32-42.
5. Горелик Г.Б. Крутильные колебания и торсионирование судовых валопроводов: учебное пособие //Хабаровск, ХГТУ. – 2003. – 36 с.
6. Бояркина У.В., Попов М.С. Устройство для определения параметров крутильных колебаний лопаток ГТД // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – Самара. – 2016. – С. 55-57.
7. Данилин А.И., Бояркина У.В., Грецков А.А., Данилин С.А. Комбинированные преобразователи для многопараметровой оценки крутильных колебаний лопаток турбоагрегатов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2018. – №4-1. – С. 107-110. URL:http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2018/2018_4_107_110.pdf
8. Бояркина У. В., Щелоков Е.А. Оптоэлектронный способ определения параметров крутильных колебаний лопаток ГТД // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2015. – С. 11-13.
9. Грецков А.А. Доплеровские преобразователи переменных элементов вращающихся узлов турбоагрегатов: автореферат дис. кандидата Технические наук: 05.13.05 / Грецков Андрей Александрович; место защиты: ФГАОУ ВО Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева], 2016.
10. Морозов А.Н., Назолин А.Л. Физические основы построения оптико-электронных систем измерительного

контроля крутильных колебаний валопровода турбоагрегата // Физические основы приборостроения. – 2016. – Т.5. – №3 (20). – С. 30-39. URL: https://cpf-bmstu.ru/pdf/ArticlesForSyte/Ar_37.pdf

11. Таранчук А.С. Крупные аварии на ТЭС в результате повреждения роторов турбогенераторов // Актуальные проблемы энергетики, БНТУ. -2016. –С. 322-327. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/34990/Krupnye_avarii_na_TEHS_v_rezultate_povrezhdeniya_rotorov_turbogeneratorov.pdf?sequence=1&isAllowed=y

12. Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий: монография. -Изд.: Наука. -2007. – 276 с.

13. Леонтьев М.К. Тензометрирование в авиационных газотурбинных двигателях: уч. пособие. -М: Издательство МАИ. – 2001. – 37 с. URL: http://www.alfatran.com/pubs/smgte_ru.pdf

14. Бояркина У.В., Грецов А.А., Данилин С.А., Дудкина Е.Е. Комбинированные преобразователи для мониторинга параметров крутильных колебаний лопаток турбоагрегатов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2018. – №4-1. – С. 111-116.

15. Носков В.Я., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д. Автодинный эффект СВЧ-генераторов с внешней синхронизацией // Радиотехника и электроника. – Т. 65. – №6. – С. 612-620. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42773442>. DOI: 10.31857/S0033849420050113

16. Варавин А.В., Васильев А.С., Ермак Г.П., Попов И.В. Автодинный прием-передающий модуль на диоде Ганна с внутренним детектированием сигнала для радиолокационного датчика с линейной модуляцией // Радиофизика та електроніка. – 2008. – Т. 13 – № 3. – С. 546-551. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/10796/11%20-%20Varavin.pdf?sequence=1> DOI: <https://doi.org/10.15407/rej>

17. Иванова Я.А., Данилин А.И. Выбор активного элемента при проектировании преобразователя крутильных колебаний ротора турбоагрегата // Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – 2021. – С. 61-62.

18. Попов М.С., Бояркина У.В. Доплеровский преобразователь крутильных колебаний ротора турбины // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций», Самара. – 2015. – С. 41-42.

19. Иванова Я.А., Данилин А.И. Способы измерения параметров крутильных колебаний ротора турбоагрегата // Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – 2021. – С. 63-64.

20. Данилин А.И. Оптоэлектронный измеритель деформаций лопаток для систем автоматического управления ГТД: автореферат дис. кандидата Технические науки: 05.13.05 / Данилин Александр Иванович; место защиты: Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный институт имени академика С.П. Королева, 1990.

Статья поступила в редакцию 12.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 621.9.047

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0020

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ЧИСЛЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПРОИЗВОДНОЙ НЕСЛОЖНОЙ ФУНКЦИИ

©2021

Соколова Александра Алексеевна, ассистент кафедры ВМиК

Уфимский Государственный Авиационный Технический университет

(450077, Россия, Уфа, улица Карла Маркса, 12, e-mail: alexandrakrasich@gmail.com)

Аннотация. В настоящее время практически вся математика представлена в электронном виде в вычислительных системах и пакетах, которые являются незаменимыми в решении математических задач. Несмотря на интенсивное применение численных методов для моделирования и проектирования различных систем, а также наличие большого количества математических программных пакетов, проблема оценки вычислительных погрешностей стоит очень остро. В рассматриваемой работе представлен метод фильтрации численных результатов для оценки ошибок и повышения точности. Показано, что предложенный метод позволяет избежать неопределенности и ограничений правил Рунге для оценки ошибок численных данных. На примере вычисления значения производной простой функции в точке было показано, что после обработки вычисленных значений с помощью предложенного метода, их реально уточнить до эталонных за несколько итераций. Рассматриваемая методика ранее применялась для уточнения численных результатов при решении задач со сложными моделями и численно-аналитическими решениями, что привело к непониманию ее практической ценности. Поэтому в данной работе проведено исследование на примере простой функции, демонстрирующее эффективность предлагаемой методики.

Ключевые слова: оценка погрешности, повышение надежности вычислений, постпроцессорная обработка данных.

THE RESEARCH OF THE NUMERICAL FILTERING METHOD BY EXAMPLE CALCULATING THE VALUES OF THE DERIVATIVE OF A SIMPLE FUNCTION

©2021

Sokolova Alexandra Alekseevna, assistant

Ufa State Aviation Technological University

(450077, Russia, Ufa, Karl Marx street, 12, e-mail: alexandrakrasich@gmail.com)

Abstract. Currently, almost all mathematics is presented in electronic computing systems and packages, which are indispensable in solving mathematical problems. Despite on the intensive using of numerical methods for modeling and designing various systems, as well as the presence of a large number of mathematical software packages, the problem of computational errors is very acute. A method of filtering numerical results for the solutions of different problems is presented for estimating the errors and increasing the accuracy. It's shown that the proposed method avoids the uncertainty and limitations of the Runge's rule for estimating errors in numerical data. Using the example of calculating the value of the derivative of a simple function at a point, it was shown that after processing the calculated values using the proposed method, they can actually be refined to the reference ones in several iterations. The technique under consideration was previously used for complex modeling tasks, which led to a lack of understanding of its practical value. Therefore, in this work, a study was carried out using a simple function as an example, demonstrating the effectiveness of the proposed technique.

Key words: error estimation, improving the reliability of calculations, data processing.

Введение. Идея использования численной фильтрации в качестве постпроцессорной обработки вычисленных данных была предложена В.П. Житниковым и Н.М. Шерыхалиной [1]. Основная идея методики – составление математической модели погрешности в виде сумм слагаемых некоторого вида и последовательное подавление этих слагаемых. Идея не имеет строгого математического доказательства, методика сугубо эвристическая. Однако ее проверка на многих сложных задачах моделирования показала эффективные результаты [2, 3]. Проведенные исследования показали, что разработанная в [1] методика позволяет получить достоверные оценки численных результатов, и на основании их делать практические выводы о моделируемых явлениях. Применение технологии фильтрации численных результатов позволя-

ет делать эти выводы с высокой точностью.

К сожалению, в силу сложности задач, которые были рассмотрены, сама методика отошла на второй план для научного сообщества. В данной работе предлагается отойти от сложных моделей и сосредоточиться на исследовании процесса фильтрации на примере расчёта значений элементарных функций.

Методы и материалы исследования. *Получение численных данных.* Итак, рассмотрим простой пример вычисления правой производной функции $\cos(x)$ в точке $x=0,5$. Будем приближаться к точке, сокращая интервал вдвое. Программная реализация рассматриваемого вычисления проста (выбираются переменные типа *double*):

```
for (int i = 0; i < N; i++)  
{
```

```

h[i] = 1.0/n;
fright[i] = (f(x + h[i]) - f(x)) / h[i];
fcentral[i] = (f(x + h[i]) - f(x - h[i])) /
(2 * h[i]);
n = n * 2.0;
}
    
```

Получаем набор значений правой $fright[i]$ и средней $fcentral[i]$ производных в количестве 20×2 (для $n=1, 2, 4, 8, \dots, 524288$) (табл.1).

Таблица 1 – Вычисленные значения производной в точке

n	fright	fcentral
1	-0,80684536	-0,40342268
2	-0,674560512	-0,459697694
4	-0,583574772	-0,474447106
8	-0,532955539	-0,47817801
16	-0,506529003	-0,479113474
32	-0,493058623	-0,479347511
64	-0,486262005	-0,479406031
128	-0,482848701	-0,479420662
256	-0,481138346	-0,479424319
512	-0,480282248	-0,479425234
1024	-0,479853969	-0,479425462
2048	-0,479639773	-0,47942552
4096	-0,479532661	-0,479425534
8192	-0,479479101	-0,479425537
16384	-0,47945232	-0,479425538
32768	-0,479438929	-0,479425539
65536	-0,479432234	-0,479425539
131072	-0,479428886	-0,479425539
262144	-0,479427212	-0,479425539
524288	-0,479426376	-0,479425539

Стандартное значение $\cos(0,5)$, декларируемое известными онлайн-калькуляторами и математическими пакетами $\cos(0,5)=-0,479425539$. Такое значение наблюдается, начиная с $n=16384$ при рассмотрении средней производной и не наблюдается при работе с правой производной. Таким образом, возникает вопрос: сколько верных знаков присутствует в полученном результате? Какое из множества возможных численных значений одного и того же параметра используется при дальнейшем решении задачи? На сколько накопилась общая ошибка вычисления, обусловленная неточными используемыми значениями?

Численная фильтрация. Аппаратом многокомпонентного анализа, представленного в [1] является процесс, который авторы назвали «фильтрацией». В данном контексте фильтрация – это набор алгоритмов и аналитических правил, которые можно применить к последовательностям вычисленных значений искомого параметра. Основная идея алгоритмов фильтрации – это использование модели погрешности вычисленного значения как суммы нескольких слагаемых с неизвестными коэффициентами

$$b_n - b = c_1 n^{-k_1} + c_2 n^{-k_2} + \dots + c_L n^{-k_L} + \Delta(n), \quad (1)$$

в данном представлении b_n – приближенный результат (значения b_n для нашего случая представлены в правых столбцах рисунка 1); b – точное значение. Разность между точным и приближенным решением является погрешностью и выражается правой частью равенства (1). c_j – неизвестные коэффициенты; k_1, \dots, k_L – произвольные действительные числа (известные), такие, что $k_1 < k_2 < \dots < k_L$. В большинстве случаев $\Delta(n)$ принимают за бесконечно малую величину. Однако мы полагаем, что величина $\Delta(n)$ не имеет априорной оценки. Более того, допускается возможным возрастанием этой величины при увеличении n (погрешность округления, не вошедшие в сумму слагаемые, оставшийся член ряда). Также на $\Delta(n)$ может влиять несовершенство самого численного метода, а также его программно-аппаратная реализация. Последний фактор напрямую зависит от конкретного разработчика, оборудования и инструментов разработки, которыми он пользуется. Поэтому оценить величину возможной ошибки или недочета заранее не предполагается возможным. Следовательно, нельзя заранее считать $\Delta(n)$ бесконечно малой величиной. Основная задача фильтрации – поэтапное избавление от степенных составляющих суммы (1). В данной работе рассматривается фильтрация при кратном увеличении числа узлов (сокращении интервала определения производной) $n_i = 2n_{i-1}$.

Теоретические основы процесса отражены в работах [1, 4]. Согласно [4], в текущем случае процесс фильтрации совпадает с формулой Ричардсона:

$$b_{n_i}^{(j)} = b_{n_i}^{(j-1)} + \frac{b_{n_i}^{(j-1)} - b_{n_{i-1}}^{(j-1)}}{Q^{k_{j-1}}}, Q=2. \quad (2)$$

Так мы проводим процедуру по всем парам значений $b_{n_{i-1}}^{(j-1)}, b_{n_i}^{(j)}$. Получается зависимость, в которой значение на каждом последующем шаге фильтрации j выражается через значения, полученные на предыдущем шаге процедуры $j-1$. Таким образом, получается зависимость, которая уже не содержит члена с n^{k_j} :

$$b_{n_i}^{(j)} = b + c_{j+1}^{(j)} n^{k_{j+1}} + \dots + c_L^{(j)} n^{-k_L} \Delta^{(j)}(n), \quad (3)$$

в рассматриваемом примере, на практике, получаемые отфильтрованные последовательности значений правой производной выглядят следующим образом:

Таблица 2 – Результаты фильтрации

n	1 фильтрация	2 фильтрация
1		
2	-0,542275664	
4	-0,492589032	-0,476026821
8	-0,482336306	-0,478918731
16	-0,480102466	-0,479357853
32	-0,479588243	-0,479416835
64	-0,479465388	-0,479424436
128	-0,479435397	-0,4794254
256	-0,47942799	-0,479425521
512	-0,47942615	-0,479425536
1024	-0,479425691	-0,479425538
2048	-0,479425577	-0,479425539
4096	-0,479425548	-0,479425539
8192	-0,479425541	-0,479425539
16384	-0,479425539	-0,479425539
32768	-0,479425539	-0,479425539
65536	-0,479425539	-0,479425539
131072	-0,479425539	-0,479425539
262144	-0,479425539	-0,479425539
524288	-0,479425539	-0,479425539

Отфильтрованная j раз последовательность содержит на один член меньше, чем $b_{n_i}^{(j-1)}$. Операции фильтрации можно последовательно повторять для $n^{-k_1} \dots n^{-k_L}$, если исходная последовательность содержит достаточное количество членов. Так как рассматриваемая функция проста, некоторые выводы можно сделать уже по двум новым последовательностям значений (табл. 2). Во-первых, очевидно, что уже после 1 фильтрации получается последовательность (3), близкая к эталонному значению (даже 1-е значение, изначально почти в 2 раза ошибочное). Во-вторых,

при проведении второй процедуры фильтрации ($j=2$), получаются значения, практически каждому из которых уже можно доверять при условии использования 4 знаков после запятой. В общем случае получаемые таким образом числовые значения должны быть подвергнуты анализу с целью оценки погрешности и обоснованию достоверности этих оценок.

Данный метод фильтрации вычисленных значений имеет ряд ограничений для его применения. Главное его ограничение – наличие составляющей $\Delta(n)$ погрешности, значение которой, естественно, неизвестно.

Конечно, уже существуют способы определения оценки погрешности. К примеру, правило Рунге. Однако данное правило дает существенный результат только в том случае, если в рассматриваемой модели доминирует слагаемое, удаляемое на данном этапе. Повторю, что мы не отрицаем возможности преобладания и последнего слагаемого $\Delta(n)$ над остальными. В таком случае, оценки по правилу Рунге могут оказаться намного меньше действительных.

Хочется особенно подчеркнуть, что фильтрация предоставляет лишь дополнительную информацию для исследователя в виде последовательностей численных данных (в отличие от методов ускорения сходимости). На основании новых полученных закономерностей проводится дальнейший анализ полученного набора решений b_n .

Результаты исследования. Одним из удобных способов анализа полученных результатов фильтрации является графический способ (рис. 1). Где, $lg\delta$ – десятичный логарифм абсолютной или относительной погрешности, $lg n$ – десятичный логарифм параметра дискретизации (количество отрезков разбиения, например). Тем самым мы отображаем точность, выраженную в количестве точных десятичных знаков. При этом каждая компонента зависимости (1) представляется на таком графике отрезком прямой.

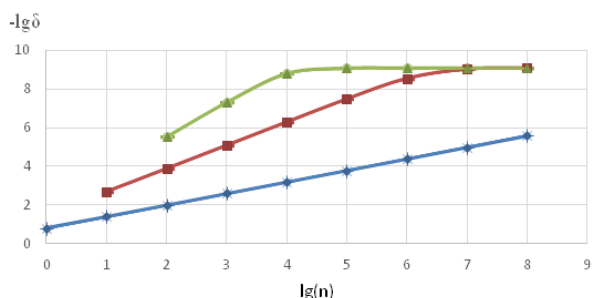


Рисунок 1 – Погрешность вычисления $\cos'(x)$, $x=0,5$

Ниже изложены разработанные правила, которых следует придерживаться при дальнейшем анализе графика отображения численных данных. Вышеупомянутая линия используется для оценки размытия оценки ошибки; вторая строка сверху используется для оценки ошибки.

1. Мы не используем верхнюю линию для оценки погрешности. Она визуализирует размытость оценки погрешности. Для погрешности (оценки) берется вто-

рая сверху линия.

2. Свидетельством убывания погрешности с увеличением n является приближенность всех линий графика по форме к прямым. Если линии загибаются вверх, это может быть сигналом того, что погрешность проходит через локальный минимум (либо меняет знак). При обнаружении данного факта следует провести дополнительный анализ.

3. Плотность точек на графике и постоянство знака оценки погрешности также играют роль. Если точки расположены редко, есть опасность спутать с прямой с той, которая не является прямой линией. Однако можно использовать разные методы для увеличения количества точек без увеличения верхнего порога количества узлов n .

Вычисляя относительную размытость оценки, становится очевидным, что проведения 2 этапов фильтрации (исключения 2 компонент (1)) достаточно для получения точности 10^{-9} на 10 итерациях.

Применение фильтрации в сложных моделях. В последних рассматриваемых нами задачах использовался интеграл Шварца вместо степенного ряда [2]. Имеем генеральную сетку, и на каждом отрезке интеграл считается по двухточечной формуле Гаусса, имеющей 4-й порядок точности относительно длины отрезка интегрирования. Почему? Формула Гаусса не требует вычисления подинтегральной функции на границах отрезка, а это важно. Для некоторых интегралов на границах имеется особенность вида $0/0$, это требует применения правил Лопиталья, что приводит к дополнительным затратам времени расчета. При применении формулы Гаусса этого не нужно. Но нужно многократное вычисление входящих в подинтегральную функцию значений. Чтобы избежать повторных вычислений, эти значения заранее рассчитываются и запоминаются. И далее происходит пересчет с запомненными числами. Все равно, это, конечно сложнее и дольше, чем вычислить частичную сумму ряда. Но это дает эффект по точности при одинаковой размерности. Один из влияющих на это факторов – это возможность применения неравномерных сеток и подбора вида этой неравномерности. При использовании степенного ряда (на окружности он превращается в ряд Фурье, т.е. в периодические функции, что требует равномерных сеток). А это иногда фатально. Однако особенности разработанных численно-аналитических методов требуют вычисления еще и интегралов функций, имеющих, к примеру, дробно-степенные особенности. Замена переменной интегрирования не эффективна, так как функции, зависящие от x в первой и других целых степенях, превращаются дробно-степенные. В данной ситуации нам на помощь приходит фильтрация (+ неравномерное разбиение отрезка интегрирования). То есть, есть генеральная сетка, есть дополнительное разбиение отрезка, ближайшего к особенности, и есть вычисление интеграла на каждом частичном отрезке на своей сетке с уменьшающимся шагом. Применяется метод средних прямоугольников, поскольку он не требует вычисления подинтеграль-

ной функции на границах отрезка интегрирования, где может быть особенность.

Заключение. Рассмотренный процесс косвенно демонстрирует жизнеспособность идеи фильтрации. Очевидно, что идея уточнения значений и оценка погрешности с помощью фильтрации дает качественное улучшение и уточнение вычисленных значений. Конечно, на таких простых примерах практическая польза подхода не очевидна, так как значения производной косинуса в точке 0,5 известно с высокой точностью. Однако для сложных вычислительных алгоритмов возможность достоверной оценки погрешности и уточнения результатов «на выходе» незаменима. Результаты оценки для таких задач проверялись с помощью получения вычисленных более точных значений (с использованием типа данных повышенной точности) [7]. На практике ведение расчетов задач численного моделирования с помощью типа данных максимальной точности не рационально и не всегда возможно.

Таким образом, предложенный подход позволяет получать более точные данные и достоверные оценки, не прибегая при этом к сложным вычислительным процессам с использованием типа данных завышенной точности, проведению множества экспериментов на разных множествах входных значений и так далее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шерыхалина Н.М. Математическое моделирование технических объектов и процессов на основе методов многокомпонентного анализа результатов вычислительного эксперимента: Дисс. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2012. – 376 с.
2. Соколова А.А. Кавитационное обтекание оболочки по несимметричной схеме Рябушинского // Межвузовский научный конгресс. Высшая школа: Научные исследования. Москва, 27 сентября, 2019г. Изд. Инфинити. С. 220 – 230.
3. Житников В. П., Шерыхалина Н. М., Соколова А. А. Предельно-квазистационарное копирование круглого электрод-инструмента // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 21, №1. С. 173–179.
4. Zhitnikov V. P., Sherykhalina N.M., Sokolova A.A. Problem of Reliability Justification of Computation Error Estimates. Mediterranean Journal of Social Sciences, 2015, Vol. 6, No. 2, pp. 65 – 78.
5. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченкова Н.В. Вычислительные методы. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 672 с.
6. Житников В.П., Шерыхалина Н.М., Поречный С.С. Об одном подходе к практической оценке погрешностей численных результатов // Научно-техн. ведомости СПбГПУ. 2009. № 3(80). С. 105–110.
7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ РФ №2018619757. Программа расчета параметров солитона Стокса / Житников В.П., Шерыхалина Н.М., Соколова А.А. Заяв. М.: Роспатент. 10.08.2018.
8. A. Bjoerck, G. Dahlquist, “Numerical mathematics and scientific computation,” vol. 1, 1999, 485 p.
9. L. W. Richargson “The deferred approach to the limit,” Phil. Trans. Roy. Soc. London, vol. 226, 1927, pp. 299 – 361.
10. V. P. Zhitnikov, N. M. Sherykhalina “Accuracy increase of complex problems solutions by numerical data post-processor handling,” Computational technologies, vol. 13, no. 6, 2008, pp. 61 – 65.
11. Paluri N.S.V., Sondur S. Experiments with Range Computations Using Extrapolation // Reliable Computing. 2007. Vol. 13. No 1. P. 1 – 23.
12. Житников В.П., Шерыхалина Н.М. Многокомпонентный анализ численных результатов. Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. 389 с.
13. Житников В.П., Шерыхалина Н.М. Оценка достоверности численных результатов при наличии нескольких методов решения задачи // Вычислительные технологии. 1999. Том 4, № 6. С. 77-87.
14. Житников В.П., Шерыхалина Н.М. Методы верификации математических моделей в условиях неопределенности // Вестник УГАТУ. 2000. № 2. – С. 53-60.
15. Каримов А.Х., Клоков В.В., Филатов Е.И. Методы расчета электрохимического формообразования. – Казань: КГУ, 1990. – 387 с.
16. Галанин М.П., Савенков Е.Б. Методы численного анализа математических моделей / М.П. Галанин, Е.Б. Савенков. – Москва; Изд-во МГТУ, 2010. – 590 с. : ил.; 24 см.
17. Житников В. П., Шерыхалина Н.М., Соколова А.А. Оценка погрешности и ее обоснование с помощью фильтрации численных результатов, полученных при разных числах узловых точек сетки // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т.19, № 1(2). С. 401–405.
18. Житников В.П., Шерыхалина Н.М. Методы верификации математических моделей в условиях неопределенности // Вестник УГАТУ. 2000. № 2. -С. 53-60.
19. Sherykhalina N.M., Zhitnikov V.P. Application of extrapolation methods of numerical results for improvement of hydrodynamics problem solution // Computational Fluid Dynamics Journ. V. 10, N 3, 2001.
20. Smith D.A., Ford W.F. Numerical comparisons of non-linear convergence accelerations. – Mathematics of Computation, 1982. V. 38. P. 481 – 499.

Статья поступила в редакцию 30.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 621.317, 681.586

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0021

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЧАСТОТНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

© 2021

Ворох Дмитрий Александрович, старший преподаватель кафедры «Радиотехники»
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
(443086 г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34, e-mail: i235385@yandex.ru)

Аннотация. Одной из наиболее распространенных характеристик, определяющих качество металлов и сплавов, является твердость и микротвердость поверхностных слоев. При этом существует потребность в методе и устройствах, которые позволяют количественно оценивать механические характеристики металла и в частности его поверхностных слоев неразрушающими и бесконтактными методами. Одно из развивающихся направлений в области неразрушающего контроля является применение вихревых токов. Вихретоковые преобразователи (ВТП) обладают рядом достоинств, которые позволяют им использоваться не только в дефектоскопии, но и в структуроскопии металлических изделий. В рамках статьи автором рассматривается математическая модель вихретокового преобразователя с частотным сканированием, которая позволяет количественно оценить свойства поверхностного слоя упрочненного металлического образца (распределение микротвердости по глубине). Математическая модель состоит из трех структурных блоков: блок, устанавливающий взаимосвязи между механическими параметрами объекта контроля (ОК) и параметрами ВТП, блок, устанавливающий взаимосвязи между параметрами полумостового ВТП и выходными напряжением и фазой, снимаемыми с этого ВТП и блок детектирования, который позволяет выделить из мгновенных значения токов и напряжений присутствующих на обмотках ВТП информационные параметры напряжения U и фазы φ .

Ключевые слова: микротвердость, твердость, вихревые токи, упрочненный слой, магнитная проницаемость, проводимость, преобразователь, датчик, неразрушающий, бесконтактный, контроль, структура.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE EDDY CURRENT PROBES WITH FREQUENCY SCANNING

© 2021

Vorokh Dmitry Aleksandrovich, senior lecturer, department of Radio Engineering
Samara National Research University named after academician S.P. Korolev
(443086 Samara, street Moskovskoe shosse, 34, e-mail: i235385@yandex.ru)

Abstract. One of the most common characteristics that determine the quality of metals and alloys is the hardness and microhardness of the surface layers. At the same time, there is a need for a method and devices that allow one to quantitatively evaluate the mechanical characteristics of a metal and, in particular, its surface layers by non-destructive and non-contact methods. One of the developing directions in the field of non-destructive testing is the use of eddy currents. Eddy current transducers (ECP) have a number of advantages that allow them to be used not only in flaw detection, but also in structureroscopy of metal products. Within the framework of the article, the author considers a mathematical model of an eddy-current transducer with frequency scanning, which allows one to quantify the properties of the surface layer of a hardened metal sample (distribution of microhardness over depth). The mathematical model consists of three structural blocks: a block that establishes the relationship between the mechanical parameters of the control object (OC) and the parameters of the ECP, a block that establishes the relationship between the parameters of the half-bridge ECP and the output voltage and phase taken from this ECP, and a detection unit that allows to extract from instantaneous values currents and voltages present on the ECP windings information parameters of voltage U and phase φ .

Keywords: microhardness, hardness, eddy currents, hardened layer, magnetic permeability, conductivity, transducer, sensor, non-destructive, non-contact, control, structure.

Введение. Одной из наиболее распространенных характеристик, определяющих качество металлов и сплавов, является твердость [1]. Помимо понятия твердости так же часто используется понятие микротвердости, это твердость очень маленьких объемов материала, т.е. отдельных зерен, фаз, структурных составляющих сплава; поверхностных слоев (слой металла с измененными физико-механическими свойствами, структурой, фазовым и химическим составом), полученных химико-термической обработкой; гальванических покрытий; и пр. [2, 3]. При этом, одним из способов задания необходимого физико-хи-

мического состояния поверхностного слоя является упрочнение [4], причем упрочнение достаточно сильно и неоднозначно влияет на эксплуатационные свойства деталей [5-9].

В результате чего существует необходимость контроля качества упрочненного слоя после процедуры его упрочнения. Характеристики упрочненного слоя можно, в частности, определить по изменению микротвердости H_μ по сечению детали. Классически микротвердость измеряется на косых срезах с помощью микротвердомера, но этот метод обладает рядом недостатков, главным из которых является разрушение

детали. В виду вышесказанного необходимы методы неразрушающего и бесконтактного контроля параметров поверхностных слоев. Известен ряд методов определения физико-механических характеристик упрочненных слоев металлических [10], но наиболее выигрышным является метод вихревых токов, который основан на способности электромагнитных волн взаимодействовать с металлом и проникать в глубь металла.

Информативным параметром вихретокового метода является напряжение, вносимое в измерительную катушку вихретокового преобразователя (ВТП). Величина вносимого напряжения зависит от состава и структуры материала, частоты переменного электромагнитного поля, возбуждающего вихревые токи, параметров датчика, величины зазора между датчиком и поверхностью материала [11].

Вопросом изучения, разработки и построения датчиков и систем на основе вихревых токов для контроля различных характеристик металлов занимается коллектив авторов из Екатеринбурга [12, 13], зарубежные коллективы [14-16]. Так же необходимо отметить большой коллектив ученых, внесших существенный вклад в развитие магнитного и вихретокового методов неразрушающего контроля: Боровик С.Ю., Васин Н.Н., Дорофеев А.Л., Ключев В.В., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Шатерников В.Е., Шкарлет Ю.М., и др.

Анализ работ показывает, что существует потребность в методе и устройствах, которые позволяют количественно оценивать механические характеристики металла и в частности его поверхностные слои по выходным параметрам ВТП.

Целью статьи является разработка и исследование математической модели вихретокового преобразователя с частотным сканированием.

Материалы и результаты исследования. На рисунке 1 представлена разработанная обобщенная структурная схема взаимодействия объекта контроля (ОК) и ВТП, как основа математической модели ВТП с частотным сканированием.

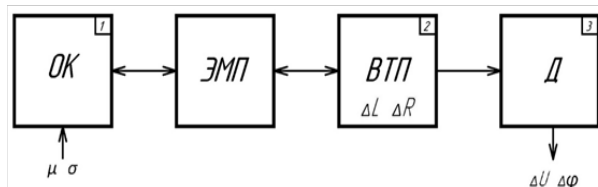


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема взаимодействия ОК и ВТП

Входными механическими параметрами являются величина микротвердости (или, например, напряжения, фазовый состав, размер зерна и т.д.). Входными электромагнитными параметрами являются магнитная проницаемость μ и проводимость σ ОК. Выходные параметры системы – это изменения выходного напряжения ΔU и изменения фазы выходного напряжения $\Delta \varphi$, снимаемые с детектора Д. ОК и ВТП взаимодействуют через электромагнитное поле (ЭМП).

При использовании ВТП нет необходимости в

полном или частичном разрушении ОК, так как ЭМП может проникать в ОК, поэтому достаточно взять один образец из партии и провести его исследование разрушающими и не разрушающими методами, далее внести полученные исходные данные о ОК в математическую модель преобразователя, после чего дальнейший контроль механических свойств остальных образцов из партии проводить бесконтактным неразрушающим способом.

Таким образом, алгоритм измерения микротвердости (или других механических параметров) должен состоять из следующих этапов:

1. Установка и ориентация ВТП напротив исследуемого участка ОК, с заданным зазором Δl между ВТП и ОК.

2. На ВТП подается переменное напряжение заданной частоты, в результате чего поле проникает в ОК на заданную глубину, где происходит интегральное взаимодействие поля ВТП и ОК, что приводит к изменению выходных параметров ВТП, эти изменения фиксируются.

3. Предыдущий пункт повторяется для заранее подготовленного набора частот, и как следствие глубин проникновения поля в структуру ОК. В результате выполнения этого пункта реализуется частотное сканирование ОК по глубине.

4. Используя результаты разрушающего контроля ОК, заранее подготовленный набор частот и результаты частотного сканирования необходимо, на основе математической модели рассчитать распределение микротвердости (или других механических параметров) по глубине ОК.

Опираясь на информацию, представленную выше, математическая модель ВТП микротвердости с частотным сканированием, можно представить следующим образом:

$$HV0, I(h) = F(U, \varphi, f) \quad (1)$$

где, $HV0, I$ – значение микротвёрдости в Викерсах; h – глубина, на которой определяется микротвердость, м; U – амплитуда выходного напряжения преобразователя, В; φ – фаза выходного напряжения преобразователя, градусы; f – частота питающего напряжения, Гц.

Используя далее обобщенную структурную схему взаимодействия ОК и ВТП (рис. 1), необходимо рассмотреть все этапы нахождения информационных параметров.

Первый этап, это установление взаимосвязи между механическими параметрами ОК и параметрами ВТП. Связь электромагнитных (μ и σ) и механических параметров объекта контроля рассмотрены в [5-9, 12-16], резюмируя которые можно заключить, что электромагнитные и механические параметры ОК связаны между собой, но эта связь не имеет точных аналитических моделей, и носит математическо-эмпирический характер. Так же существует математическая модель [17, 18] связывающая магнитную проницаемость μ_i и проводимость σ_i i -го слоя идеально слоистого ОК с электрическими параметрами ВТП. Однако, сами по себе параметры магнитной проницаемости и прово-

димости не являются информационными в практических механических аспектах, поэтому существует необходимость предварительно установить корреляционные связи параметров ВТП с информативными механическими параметрами, например, с микротвёрдостью. При этом разработка точной аналитической модели довольно трудоёмка и сложна [19], поэтому получить искомую зависимость можно на основе экспериментальных исследований и методов статистической обработки полученных данных. Основной задачей, требующей решения при таком подходе, является установление связи между параметрами ОК, а именно микротвёрдостью $HV0,1$ и параметрами ВТП, то есть индуктивностью L и сопротивлением R [11].

Одним из возможных способов установления связи между микротвёрдостью и параметрами ВТП, является построение регрессионной модели [21-23]. Для идентификации неизвестных параметров множественной регрессии, линейно зависящей от неизвестных параметров, применим метод наименьших квадратов. Оценку адекватности построенной модели по экспериментальным наблюдениям даёт коэффициент детерминации R^2 . Значимость уравнения множественной регрессии в целом оценивается общим F -критерием Фишера.

При этом необходимо отметить, что получение параметров модели взаимодействия объекта контроля с абсолютным ВТП, обязательно при измерении параметров новой партии ОК, изменении технологических операций при производстве ОК или изменении материала ОК.

Так как основной задачей работы является определение распределения микротвёрдости по глубине, то определить глубину проникновения поля ВТП в ОК можно в соответствии с [18], по формуле:

$$h = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu_{отн} \mu_0 2\pi f}} \quad (2)$$

где, σ – удельная электрическая проводимость электропроводящего материала; $\mu_{отн}$ – относительная магнитная проницаемость электропроводящего материала; μ_0 магнитная постоянная; f – частота питающего напряжения.

Второй этап, это разработка математической модели ВТП. В простейшем случае ВТП представляет собой одну катушку и содержит N витков – абсолютный ВТП. Эквивалентная схема замещения [25, 26] такой катушки содержит индуктивность, сопротивление потерь и ёмкость, в результате чего данная система может проявлять выраженные частотно-избирательные свойства. Абсолютные ВТП обладают рядом недостатков, которые устраняются использованием мостовых схем ВТП [27]. Мостовая схема [2, 11, 20, 28] содержит 4 катушки, вследствие чего частотные свойства мостового ВТП становятся еще более выраженными. Поэтому при проектировании ВТП для измерительных систем, где требуется перестройка частоты питающего напряжения ВТП в широких пределах (частотное сканирование), необходимо учитывать, а в некоторых случаях и формировать частотную характеристику самого ВТП.

Далее, для упрощения рассмотрения, целесообразно взять полумостовой вариант ВТП, как частный случай мостового ВТП.

Эквивалентная схема полумостового ВТП изображена на рисунке 2. Каждая катушка ВТП замещается отдельным параллельным колебательным контуром с компонентами L, R, C и R . Резистор R_3 и R_4 имитирует входное сопротивление последующего каскада и т.п. Учет емкости монтажа, межвитковой и других емкостей производится конденсаторами C_1 и C_2 . Резистор R_2 соответствует сумме активного сопротивления катушки L_2 на постоянном и переменном токе и вносимой добавки ΔR , которая отражает потери энергии от протекания вихревых токов в поверхности ОК. Значение индуктивности L_2 и некоторой добавки $\pm \Delta L$, отражающей влияние ОК на ВТП, учтены в компоненте L_2 .

Комплексный коэффициент передачи эквивалентной схемы замещения полумостового ВТП, составленный на основе эквивалентной схемы обозначим $K(j\omega)$. Импеданс параллельного колебательного контура, образованного катушкой L_2 , обозначен в математической модели как $Z_2(j\omega)$.

Эквивалентное сопротивление каждой катушки отображены в формулах:

$$Z_1(j\omega) = \frac{j\omega L_1 + R_1}{1 + j\omega(R_1 C_1 + \frac{L_1}{R_3}) - (\omega)^2 L_1 C_1}, \quad (3)$$

$$Z_2(j\omega) = \frac{j\omega L_2 + R_2}{1 + j\omega(R_2 C_2 + \frac{L_2}{R_4}) - (\omega)^2 L_2 C_2} \quad (4)$$

Тогда коэффициент передачи описывается формулой:

$$K(j\omega) = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{Z_2(j\omega)}{Z_1(j\omega) + Z_2(j\omega)} = Re + iIm \quad (5)$$

где, Re – это действительная часть комплексного коэффициента передачи, Im – это мнимая часть комплексного коэффициента передачи.

Решая уравнение (5) с учетом уравнений (3) и (4), определяется действительная и мнимая части комплексного коэффициента передачи, представленные ниже:

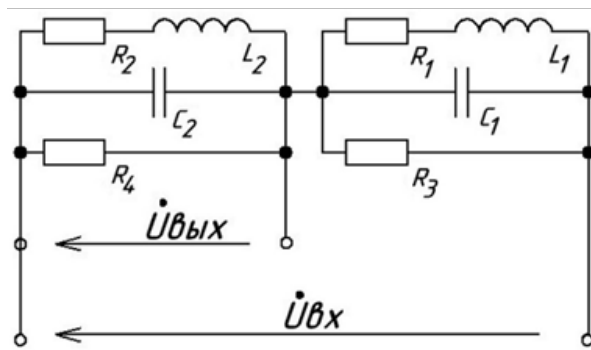


Рисунок 2 – Эквивалентная схема полумостового ВТП

$$Re = \frac{(L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2 + R_4 \cdot R_2) \cdot \left(\frac{R_1}{L_1^2 \cdot \omega^2 + R_1^2} + \frac{R_2}{L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)}{R_4 (L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2) \cdot \left[\left(\frac{R_1}{L_1^2 \cdot \omega^2 + R_1^2} + \frac{R_2}{L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)^2 + \left(C_1 \cdot \omega + C_2 \cdot \omega - \frac{L_1 \cdot \omega}{L_1^2 \cdot \omega^2 + R_1^2} - \frac{L_2 \cdot \omega}{L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2} \right)^2 \right] + \omega (C_2 \cdot L_2^2 \cdot \omega^2 - L_2 + C_2 \cdot R_2^2) \cdot \left(C_1 \cdot \omega + C_2 \cdot \omega - \frac{L_1 \cdot \omega}{L_1^2 \cdot \omega^2 + R_1^2} - \frac{L_2 \cdot \omega}{L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2} \right)}{(L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2) \cdot \left[\left(\frac{R_1}{L_1^2 \cdot \omega^2 + R_1^2} + \frac{R_2}{L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)^2 + \left(C_1 \cdot \omega + C_2 \cdot \omega - \frac{L_1 \cdot \omega}{L_1^2 \cdot \omega^2 + R_1^2} - \frac{L_2 \cdot \omega}{L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2} \right)^2 \right]}$$

$$Im = \frac{\omega(C_2 \cdot L_2^2 \cdot \omega^2 - L_2 + C_2 \cdot R_2^2) \cdot \left(\frac{R_1}{L_1^2 \cdot \omega^2 + R_1^2} + \frac{R_2}{L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)}{(L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2) \cdot \left[\left(\frac{R_1}{L_1^2 \cdot \omega^2 + R_1^2} + \frac{R_2}{L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)^2 + \left(C_1 \cdot \omega + C_2 \cdot \omega - \frac{L_1 \cdot \omega}{L_1^2 \cdot \omega^2 + R_1^2} - \frac{L_2 \cdot \omega}{L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2} \right)^2 \right]} - \frac{(L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2 + R_4 \cdot R_2) \cdot \left(C_1 \cdot \omega + C_2 \cdot \omega - \frac{L_1 \cdot \omega}{L_1^2 \cdot \omega^2 + R_1^2} - \frac{L_2 \cdot \omega}{L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2} \right)}{R_4 (L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2) \cdot \left[\left(\frac{R_1}{L_1^2 \cdot \omega^2 + R_1^2} + \frac{R_2}{L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)^2 + \left(C_1 \cdot \omega + C_2 \cdot \omega - \frac{L_1 \cdot \omega}{L_1^2 \cdot \omega^2 + R_1^2} - \frac{L_2 \cdot \omega}{L_2^2 \cdot \omega^2 + R_2^2} \right)^2 \right]}$$

После этого выходное напряжение U полумостового ВТП, определяется выражением

$$U = |K(j\omega)| \cdot \sqrt{Re^2 + Im^2} \quad (6)$$

Фаза φ (аргумент) выходного напряжения полумостового ВТП, зная комплексный коэффициент передачи, определяется выражением:

$$\varphi = \arctan \frac{Im}{Re} \quad (7)$$

Для примера, подставляя конечные значения параметров полумостового ВТП ($L_1 = 5$ мкГн; $R_1 = 10$ Ом; $f = \omega/2\pi = 1$ МГц; $R_2 = 9,5$ Ом; $R_3 = 100$ кОм; $R_4 = 10$ кОм; $C_1 = 6.8$ пФ; $C_2 = 7$ пФ) в уравнения (6) и (7), получим две функции – напряжение U и фаза φ , в которых переменными являются 3 параметра: индуктивность измерительной катушки L , сопротивление измерительной катушки R и рабочая частота f . В данном случае рабочая частота f является постоянной величиной, так как в рамках одного измерения ее значение не меняется.

Трехмерные изображения, построенные в *Math CAD*, приведены на рисунке 3.

Анализируя рисунки 3 и 4, можно сделать несколько выводов:

1) вносимая активная добавка ΔR слабо влияет на частотные характеристики эквивалентной схемы;

2) вносимая индуктивная добавка $\pm \Delta L$ сильно влияет на частотные характеристики эквивалентной схемы. Из рисунка 3 следует, что существует некоторое значение индуктивности L_2 , при которой на любых частотах $|K(j\omega)|$ равен одному и тому же значению (в рассматриваемом случае он равен 0,5);

3) как следует из результатов моделирования полумостовой ВТП обладает усилительными свойствами, то есть его комплексный коэффициент передачи больше единицы;

4) существует такая частота питающего напряжения ВТП, при которой происходит линейное изменение модуля комплексного коэффициент передачи при изменении индуктивности L_2 и практически отсутствует изменение аргумента. Для рассматриваемой эквивалентной схемы эта частота равна 8МГц, изменение модуля происходит в пределах (0,1...0,9), а аргумента в пределах (2...8) градусов;

5) манипулируя значениями питающих частот можно управлять как усилительными свойствами ВТП, так и крутизной преобразования индуктивной добавки $\pm \Delta L$, вносимой ОК в выходное напряжение ВТП. Причем эти два процесса управления можно проводить независимо друг от друга;

6) существует возможность линеаризации характеристики преобразования зазора между ВТП – ОК в выходное напряжения ВТП при правильном выборе частоты питающего напряжения ВТП.

Таким образом, для решения задач дефектоскопии металлических поверхностей с помощью ВТП необходимо выбрать на АЧХ ВТП участок с необходимой крутизной преобразования.

Для задач структуроскопии необходимо учитывать вид АЧХ ВТП в схеме обработки данных при перестройке рабочих частот по диапазону или иметь набор переключаемых ВТП, настроенных на работу в узком диапазоне частот, где частотные свойства ВТП слабо выражены.

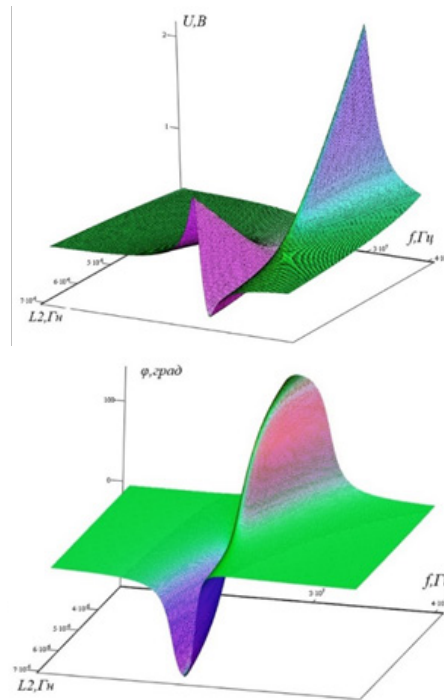


Рисунок 3 – Зависимость модуля и аргумента комплексного коэффициента передачи от индуктивности L_2 и частоты f

Третий этап, детектирование. Процедура детектирования позволяет выделить информационные параметры напряжения U , и фазы φ , так как именно в них и заключена информация о свойствах ОК. Наиболее простая реализация амплитудного детектора представлена в [30], однако она имеет ряд недостатков [11] и автором была предложена схема синхронного детектора [31, 32], выходное напряжение которого, для полумостового ВТП, определяется по формуле.

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{2}{\pi} (U \cos(\varphi) - U_{\text{см}}), \quad (8)$$

где, $U_{\text{см}}$ – напряжение смещения

На основании моделей, рассмотренных выше разработана методика определения микротвердости с использованием сканирующего ВТП. Методика подразумевает несколько этапов, рассмотрим их поочередно:

1) необходимо определить марку исследуемого ОК и выяснить (экспериментальным путем или используя справочную информацию) его электрические параметры ($\mu_{\text{омн}}$ и σ);

2) разрушающими методами определить искомые механические параметры ОК (значения микротвердости в упроченном слое определённые на различном расстоянии от поверхности ОК, то есть на разных

глубинах) и выявить их взаимосвязь с электрическими параметрами ВТП, а именно с индуктивностью и сопротивлением;

3) на основе разрушающего контроля определить максимальную толщину упрочненного слоя и значения глубин, на которых производились измерения микротвердости;

4) на основании (2) рассчитать значения частоты питающего напряжения, для каждой из полученных ранее глубин;

5) на основе рекомендаций, представленных в [24, 33] необходимо определить средние геометрические размеры измерительной и опорной катушки ВТП и зазор между измерительной катушкой ВТП и ОК;

6) определив экспериментально параметры ВТП (L_p ; R_p ; C_2 и др.), их подставляют в аналитические выражения (6, 7) и определяют попадают ли значения из массива частот полученные в пункте 4, на участок с выраженными частотными свойствами, попавшие значения частоты исключаются из расчетов;

7) изготовленный ВТП размещается над ОК, на заданном расстоянии, которое поддерживается неизменным на протяжении всего процесса измерения;

8) на ВТП подается первое значение частоты из массива частот, и измеряется значение амплитуды выходного напряжения U (В), фазы выходного напряжения φ (град). Эти измерения повторяются для всех значений из массива частот с учетом рекомендаций этапа 6;

9) значение амплитуды выходного напряжения U (В), фазы выходного напряжения φ (град) и соответствующей им частоты f (МГц), а так же остальные параметры модели ВТП подставляются в выражения (5-7). Такие значения индуктивности L_2 и сопротивления R_2 , которые удовлетворяют равенству (5). Вышеуказанные действия повторяются для всего массива значений;

10) на основании данных разрушающего эксперимента (этап 2 и 3), необходимо построить и выбрать регрессионную модель (этап 1);

11) в выбранную регрессионную модель вносятся параметры L_2 , R_2 , и вычисляется значение микротвердости $HV0, I_{\text{эсп}}$ полученное на заданной частоте (и как следствие заданной глубине). В результате получается массив значений микротвердости $HV0, I$, экспериментально полученных на заданных глубинах.

Заключение. Автором статьи предложена методика определения микротвердости с помощью вихретокового преобразователя с частотным сканированием. Разработана математическая модель полумостового ВТП, предназначенного для создания вихретокового преобразователя с частотным сканированием. На основании разработанных математических моделей проведено компьютерное моделирование полумостового ВТП с учетом разработанной для него математической модели. В рамках моделирования определены основные пути влияния объекта контроля, в виде металлического образца, на выходное напряжение ВТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Методы измерения твердости металлов URL: <http://www.knifehelp.net/media/docs/opredelenieHRC.pdf> (дата обращения: 04.04.2019)
2. Ворох Д.А., Данилин А.И. Мостовой вихретоковый преобразователь и анализ его экспериментальных частотных характеристик // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Том 18, № 4 (6). – С. 1268-1271
3. Микротвердость материалов; Методические указания к лабораторной работе / Сост. Паршев С. Н., Полозенко Н. Ю. / ВолГТУ, Волгоград, 2004 – 15с
4. Повышение эксплуатационных свойств деталей путем регулирования состояния поверхностного слоя при механической обработке: Учебное пособие /Митряев, К.Ф. Куйбышев: КуАИ, 1986, 91с.
5. В.Ф. Матюк, З. М. Короткевич, А. А. Осипов влияние структурных изменений в стали у10а при закалке от разных температур на ее квазистатические магнитные характеристики весці нацыянальнай акадэміі навук беларусі № 1 2012
6. Филатов, И.А. Взаимосвязь магнитных и механических свойств стали 20ГЛ после нормализации/И.А. Филатов, К.В. Макаренко//«Новые материалы и технологии в машиностроении –2006» 5-я Междунар. науч.-техн. конф. – Брянск, 2006. – С. 108-112.
7. В. А. Сандовский, Е. М. Файншмидт Исследование магнитной проницаемости стальных образцов в однородном переменном поле при упругой деформации на растяжение изв. Вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 3
8. Влияние структуры и напряженного состояния на магнитные свойства металла в различных зонах сварных труб большого диаметра физика металлов и металлведение, 2014. – том 115 – № 10. – С. 1011–1018
9. Структура и физико-механические свойства спеченных материалов системы Fe-Si, полученных из механически активированных на воздухе порошков. Физика и химия обработки материалов 2011, №5. – С.56-61
10. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005 г
11. Ворох Д.А., Иванова Я.А. Эквивалентная схема мостового вихретокового преобразователя//Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции (г. Самара, 16-18 мая 2017г) Самара: ООО «Офорт», 2017. – С. 58-60
12. Вихретоковый контроль твердости и абразивной износостойкости высокопрочного чугуна, подвергнутого лазерной закалке и последующему отпуску / А. В. Макаров, А. Л. Осинцева, Э. С. Горкунов [и др.] // IV Российская научно-техническая конференция "Ресурс и диагностика материалов и конструкций" г. Екатеринбург, 26-28 мая 2009 г. - Екатеринбург, 2009. – С. 107.
13. Вихретоковый контроль фазового состава и твердости метастабильной аустенитной стали после различных режимов наноструктурирующей фрикционной обработки А.В. Макаров, Э.С. Горкунов, П.А. Скорынина и др. Дефектоскопия, № 11, 2016
14. Экспериментальные исследования механических свойств металлических изделий бесконтактным методом. Б.М. Горкунов, С.Г. Львов, А.А. Тищенко, Аббаси Жаббар Вісник НТУ «ХПИ», 2017. – 27(1249)
15. Горкунов Б. М., Тюпа И. В., Тищенко А. А. Выбор рациональных размеров катушек вихретокового преобразователя для контроля металлических изделий // Вестник НТУ ХПИ. – 2008. – №49
16. The Effect of Hardness on Eddy Current Residual Stress Profiling in Shot-Peened Nickel Alloys J Nondestruct Eval (2010) 29: 143–153
17. Соболев В. С. Накладные и экранные датчики (для контроля методом вихревых токов) / В. С. Соболев, Ю. М. Шарлет. – Новосибирск : Наука, 1967. – 144 с.
18. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
19. Распределение плотности вихревых токов в металлическом образце, возбуждаемых полем линейного тока / Г. М. Сучков [и др.] // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2014. – № 44 (1087). – С. 170-175.
20. Иванова Я.А., Руденко Е.А., Садыков А.Н. Ворох Д.А. Мостовой вихретоковый преобразователь перемещения и его конструктивная компоновка // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: ООО «Офорт», 2016. – С. 73-76.
21. Коломиец Л. В. Метод наименьших квадратов: метод. указания / сост.: Л.В. Коломиец, Н.Ю. Поникарова. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 32 с.

22. Эконометрика. Парная регрессия: метод, указания к лабораторным работам / сост. А.П. Котенко, О.А. Кузнецова. – Самара: Издательство Самарского университета, 2016. – 48 с.
23. Эконометрика. Множественная регрессия: метод, указания к лабораторным работам / сост. А.П. Котенко, О.А. Кузнецова. – Самара: Издательство Самарского университета, 2016. – 20 с.
24. Ляченков Николай Васильевич. Вихретоковые контрольно-измерительные модули систем управления технологическими процессами: диссертация доктора технических наук: 05.13.05. – Самара, 2000. – 335 с.: ил.
25. Маркелов М.К. Разработка вихретокового преобразователя для измерения зазора // Труды Международного симпозиума: в 2-х т. «Надежность и качество – 2011». Т. 2. П.: Изд-во ПГУ, 2011. – С. 270-273.
26. В. П. Маланин, А. Д. Семенов измерение информативных параметров вихретоковых датчиков с использованием настраиваемых моделей информационные технологии в измерениях 2014. – № 4 (10)
27. Вихретоковые датчики: каталог. URL: <http://rohmann.ru/pdf/Sensors.pdf> (дата обращения: 04.04.2019).
28. Данилин А.И., Ворох Д.А. Анализ частотных характеристик мостового вихретокового преобразователя перемещения // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: матер. Всерос. науч.-техн. конф. Самара: ООО «Офорт», 2016. – С. 77-80.
29. Харкевич А.А. Основы радиотехники. 3-е издание, стереотипное. — М.: Физматлит, 2007, стр. 446...450
30. Данилин А.И., Медников В.А., Чернявский А.Ж., Капустин А.С. Первичный преобразователь для реализации оптоэлектронного дискретнофазового метода измерения деформаций лопаток турбомашин // Известия Самарского научного центра РАН. 2003. Т. 5. – №2. – С. 388-395.
31. Ворох Д.А., Данилин А.И., Дудкина Е.Е. Математическая модель синхронного детектора для мостового вихретокового преобразователя // Известия Самарского научного центра РАН. – 2018. – Том 20, № 6 (2). – С. 391-394
32. Ворох Д.А., Данилин А.И., Бояркина У.В. Синхронный детектор для мостового вихретокового преобразователя // Известия Самарского научного центра РАН. — 2017. – Том 19, № 4. – С. 167-170
33. Санников Максим Анатольевич. Диагностический вихретоковый модуль для систем управления каналами газоснабжения : диссертация кандидата технических наук : 05.13.05 / Санников Максим Анатольевич; Самара, 2007. – 191 с.: ил.

Статья поступила в редакцию 12.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 531.7:681.5

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0022

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО
ДИСКРЕТНО-ФАЗОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

© 2021

Данилин Сергей Александрович, старший преподаватель кафедры радиотехники
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34, e-mail: danilin.sa@ssau.ru)

Аннотация. В статье описываются полученные аналитические выражения для модели процесса взаимодействия зондирующего излучения оптического диапазона с криволинейной поверхностью лопатки газотурбинного двигателя и формирования информационного сигнала первичного преобразователя, позволяющие определить профиль и кривизну в произвольной точке поверхности пера лопатки. При разработке математической модели использованы: основные положения дискретно-фазового метода, теоретические положения фотометрии и геометрической оптики, методы интегрального и дифференциального исчисления, имитационное компьютерное моделирование, математический аппарат аналитической геометрии и линейной алгебры, численные методы решения дифференциальных уравнений. Разработанная модель позволяет получать количественную оценку информационной части сигнала фотоприемника – положения максимума импульса фотоприемника, а также определять факторы, влияющие на положение информационного параметра: изменение установочных зазоров, диаметра приемно-передающего коллектора оптической насадки, а также выявить особенности формирования фронтов импульсов фотоприемника и выработать рекомендации для конструкторской реализации оптоэлектронного дискретно-фазового преобразователя геометрии поверхности лопаток. В заключении сделаны выводы по проделанной работе.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, лопатка, профиль лопатки, кривизна боковой поверхности лопатки, дискретно-фазовый метод, оптоэлектронный дискретно-фазовый преобразователь, приемно-передающий коллектор, оптическая насадка, индикатриса излучения, световой поток, фотоприемник.

**A MATHEMATICAL MODEL OF THE OPERATION OF AN OPTOELECTRONIC DISCRETE-PHASE
CONVERTER FOR AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF THE GEOMETRY OF THE SURFACE OF
THE BLADES OF A GAS TURBINE ENGINE**

© 2021

Danilin Sergey Alexandrovich, senior lecturer of the department of radio engineering
Samara National Research University named after Academician S. P. Korolyev
(34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia, e-mail: danilin.sa@ssau.ru)

Abstract. The article describes the obtained analytical expressions for the model of the interaction of the probing radiation of the optical range with the curved surface of the turbine unit blade and the formation of the information signal of the primary converter, which allow determining the profile and curvature at an arbitrary point of the surface of the feather of the gas turbine engine blade. In the development of the mathematical model, the following were used: the main provisions of the discrete-phase method, theoretical provisions of photometry and geometric optics, methods of integral and differential calculus, mathematical modeling, simulation computer modeling, mathematical apparatus of analytical geometry and linear algebra, numerical methods for solving differential equations. The developed model makes it possible to obtain a quantitative assessment of the information part of the photodetector signal - the position of the maximum pulse of the photodetector, as well as to determine the factors affecting the position of the information parameter: changes in the installation gaps, the diameter of the PPC of the optical nozzle, as well as to identify the features of the formation of the photodetector pulse fronts and to develop recommendations for the design implementation of an optoelectronic discrete-phase converter of the geometry of the surface of the blades. In conclusion, conclusions are drawn on the work done.

Keywords: gas turbine engine, blade, blade profile, curvature of the side surface of the blade, discrete-phase method, optoelectronic discrete-phase converter, receiving-transmitting collector, optical nozzle, radiation indicatrix, luminous flux, photodetector.

Введение. Лопатки газотурбинных двигателей (ГТД) представляют собой изделия со сложной пространственной конфигурацией, например, лопатки компрессора относительно тонкие со значительным перепадом по толщине от периферийного к корневому сечению, имеющие малую кривизну и при этом отличающиеся высокой геометрической точностью изготовления [1, 2]. Высокая точность изготовления пера

лопатки ГТД обусловлена сложным балансом между аэродинамическими, прочностными характеристиками и производственно-технологическими требованиями [3, 4]. В связи с этим задачи повышения точности определения геометрии при изготовлении лопаток ГТД являются востребованными и важными.

Бесконтактное определение геометрических параметров поверхностей сложно-профилированных

объектов базируются, в основном, на оптоэлектронных методах, которые в свою очередь реализуются с помощью сложных оптико-механических систем и многоэлементных фотоприемников. Необходимо отметить сложность их настройки и юстировки, а также в большинстве своем, требующих лабораторных, не цеховых условий эксплуатации. С другой стороны потенциальная точность и возможность практической автоматизации процессов измерения, заложенные в оптоэлектронных методах, являются основой разработки быстродействующего оптоэлектронного дискретно-фазового преобразователя для автоматизированного контроля геометрии пера лопаток ГТД. Кроме этого, в связи с возрастанием требований к надежности и точности контроля поверхности лопаток ГТД возникает необходимость в дополнительной информации о параметрах геометрии пера лопатки таких, как кривизна поверхности, что расширяет функциональные возможности преобразователя и повышает достоверность измерений. Обзор методов определения геометрии поверхностей лопаток ГТД показывает, что проводимые исследования направлены в основном на совершенствование теории и способов свето-теневых, интерферометрических, триангуляционных измерений в сочетании с многоэлементными разветвляющимися фотоприемниками; совершенствованием компьютерных систем технического зрения, компьютерно-программной обработкой информационных сигналов [5-12]. Следует также отметить общий недостаток этих систем, состоящий в том, что в их основе лежит амплитудный метод обработки параметров информационных сигналов фотоприемников.

Автором предложен новый метод [13-15] определения параметров сложно-профильных поверхностей, основанный на теории дискретно-фазовых преобразователей (ДФП) [16]. Разрабатываемый оптоэлектронный дискретно-фазовый преобразователь (ОЭДФП) позволяет:

- оперативно проводить качественное сравнение с эталоном;
- реализовать многопараметровость контроля, позволяя одновременно определять профиль поверхности в требуемых сечениях и кривизну поверхности пера лопатки;
- представлять результаты контроля геометрии поверхности лопаток в форме адекватной общепринятой для разработчиков лопаток турбоагрегатов;
- не требует сложных математических вычислений и наличия комплексной структурной подсветки, как стереометрический метод;
- не требует точного двумерного сканирования, как триангуляционный метод;
- проводить двусторонний контроль, т.е. не требует переворачивания лопатки;
- контролировать широкую номенклатуру лопаток различной формы и размеров.

Целью статьи является разработка и исследование математической модели процесса взаимодействия зондирующего излучения оптического диапазона с

криволинейной поверхностью лопатки ГТД и формирования информационного сигнала оптоэлектронного первичного преобразователя (ОЭП), позволяющая определить профиль поверхности лопатки и ее кривизну в произвольной точке пера лопатки.

Материалы и результаты исследования. Развитие предложенного и защищенного патентами способа [13, 14] заключается в том, что классический дискретно-фазовый метод [16] обладает признаком обратимости, т.е. можно зафиксировать контролируемую поверхность в статическом положении, а в движение приводить ОЭП. При своем вращении ОЭП сканирует световым потоком поверхность объекта и одновременно принимает отраженный от контролируемой поверхности световой поток. Максимум отраженного светового потока, преобразованного фотоприемником в электрический сигнал, соответствует моменту времени, когда ось индикатрисы излучения светового потока перпендикулярна исследуемой поверхности. Таким образом, измеряя временной интервал между максимумом информационного сигнала и максимумом опорного импульсного сигнала, соответствующего нулевому углу поворота ОЭП, можно определять угловое положение касательной в конкретной точке на криволинейной поверхности, т.е. оценивать кривизну поверхности.

Основным элементом базовой структурной схемы ОЭДФП является вращающаяся светопроводящая система с оптической насадкой (ОН). Светопроводящая система выполнена на основе разветвленных V -образных световодных структур [17]. ОН позволяет канализировать и направлять поток излучения от передающей части светопроводящей системы на исследуемую поверхность, принимать отраженный от поверхности лопатки поток и с помощью приемной части светопроводящей системы канализировать его к фотоприемнику. Элемент оптической насадки, выполняющий функции излучателя и приемника излучения – приемно-передающий коллектор (ППК). Отраженный от исследуемой поверхности поток излучения содержит в себе информационные компоненты о параметрах геометрии поверхности лопатки. Поэтому важно разработать математическую модель взаимодействия сформированного ОН потока излучения с криволинейной поверхностью лопатки, получить количественные оценки информационного сигнала и после его анализа разработать алгоритм функционирования преобразователя геометрии поверхности лопаток ГТД.

На рисунке 1 в формализованном виде представлен процесс взаимодействия излученного приемно-передающим коллектором ОЭДФП потока с боковой поверхностью P (спинкой) лопатки в терминологических категориях фотометрии и геометрической оптики. Представленная схема позволяет перейти к математическому описанию процесса определения величины информационного потока Φ_{np} , попадающего в фотоприемник после отражения от контролируемой поверхности лопатки, при линейном перемещении оси оптической насадки по линии EL и вращении

OH в плоскости заданного сечения, расположенного параллельно базовой плоскости. Таким образом, в прямоугольной системе координат XYZ в некоторый момент времени ось вращения OH находится в точке L с известными координатами (X_L, Y_L) . ППК OH представлен на рисунке 1 круговой поверхностью F . При работе устройства продольная ось OH образует с горизонталью параллельной оси OX текущий угол γ .

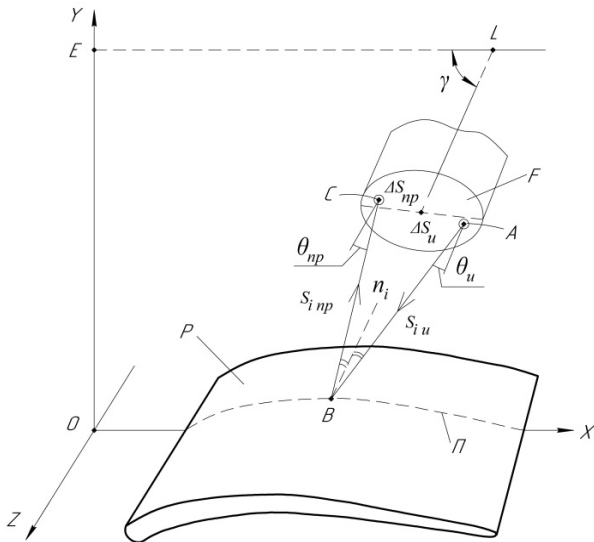


Рисунок 1 – Формализованная схема взаимодействия ППК оптической насадки ОЭДФП с боковой поверхностью пера лопатки

Обозначения, принятые в рассматриваемой системе:

Π – профиль лопатки, функциональное задание линии которого известно и определяется как $y_{\Pi} = f(x)$;

n_i – нормаль к поверхности лопатки в точке контроля B ;

S_{iu} – длина пути i -го луча от центра элементарной излучающей площадки ППК F до отражающей точки конкретного профиля Π боковой поверхности P лопатки;

S_{inp} – длина пути i -го луча от отражающей точки конкретного профиля Π боковой поверхности P лопатки до центра элементарной приемной площадки ППК F ;

A и C – центры, соответственно, элементарных излучающих и приемных площадок ППК ΔS_u и ΔS_{np} ;

B – точка отражения излученного луча, принадлежащая линии профиля Π ;

θ_u – угол излучения i -х лучей индикатрисы излучения $J(\theta_u)$;

θ_{np} – угол приёма приёмно-передающим коллектором, отраженных от боковой поверхности лопатки i -х лучей;

r – радиус ППК оптической насадки;

R – радиус вращающейся оптической насадки.

На основании законов фотометрии и геометрической оптики [18, 19] элементарный поток Φ_{inp} , создающий освещенность $E(\theta_{np})$ элементарной площадки ΔS_{np} , определяется выражением: $\Delta \Phi_{inp} = E(\theta_{np}) \Delta S_{np}$. Освещенность $E(\theta_{np})$ площадки, наклоненной под

углом θ_{np} , от отдельного i -го луча индикатрисы излучения: $E(\theta_{np}) = \frac{J(\theta_u)}{s^2} \cos \theta_{np}$, где $s = s_{iu} + s_{inp}$.

Для определения светового потока от каждого луча индикатрисы излучения $J(\theta_u)$, попадающего после отражения на ППК, предлагается воспользоваться моделью, представленной на рисунке 2. В этой модели изображен i -ый излученный S_{iu} и отраженный и, соответственно, принятый S_{inp} лучи, а слева их проекции на плоскость ППК. Такой подход позволяет упростить нахождение требуемых фотометрических характеристик путём последующего перехода к полярным координатам. На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

K_i – след плоскости касательной к боковой поверхности лопатки в точке B для i -го излученного луча;

σ – расстояние от ППК до точки отражения B ;

l_u и l_{np} – длины проекций лучей S_{iu} и S_{inp} на торец ППК;

α и ρ – полярные координаты точки A – центра элементарной излучающей площадки;

φ и l – полярные координаты точки C – центра элементарной приёмной площадки.

β – текущий угол наклона следа плоскости касательной к боковой поверхности лопатки относительно ППК в точке отражения зондирующего луча.

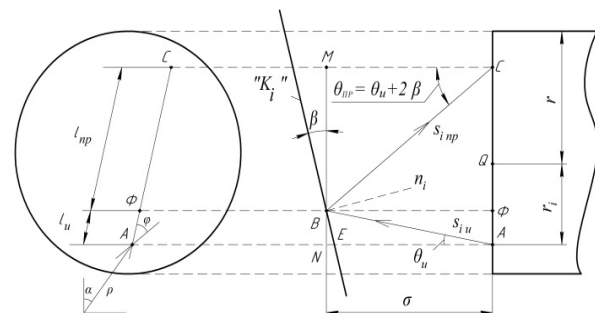


Рисунок 2 – Модель формирования информационного светового потока

При нахождении информационных параметров отраженного от поверхности лопатки и принятого ППК OH светового потока, в соответствии с рисунком 2, можно записать следующие необходимые для расчетов выражения:

$$s_{iu} = \frac{\sigma}{\cos \theta_u}; \theta_{np} = \theta_u + 2\beta; s_{inp} = \frac{\sigma}{\cos \theta_{np}} = \frac{\sigma}{\cos(\theta_u + 2\beta)}$$

и соответственно:

$$s = s_{iu} + s_{inp} = \sigma \left[\frac{1}{\cos \theta_u} + \frac{1}{\cos(\theta_u + 2\beta)} \right];$$

$$l_u + l_{np} = l = \sigma [\operatorname{tg} \theta_u + \operatorname{tg}(\theta_u + 2\beta)].$$

Для полной фотометрической характеристики боковой поверхности пера лопатки необходимо использовать индикатрису рассеяния $T(\theta_{np})$ оптического излучения, отраженного этой поверхностью. В разрабатываемой модели ОЭДФП рассматривается индикатриса рассеяния в плоскости сечения (или профиля) лопатки, при этом предполагается, что кривизна пера лопатки оказывает влияние на макрогеометрию лопатки

ки, а не на геометрию микроповерхности [7]. Поэтому в точке C – центре элементарной приёмной площадки будет зарегистрирован элементарный световой поток от i -го луча индикатрисы $J(\theta_u)$, отраженного в точке B с учетом индикатрисы рассеяния $T(\theta_{np})$:

$$\Delta\Phi_{i,np} = \Delta S_{np} T(\theta_{np}) \frac{J(\theta_u)}{s^2} \cos \theta_{np}.$$

Потери при вводе оптического излучения из воздуха на границу стекла OH , классифицируемые как френелевские, составляют примерно (0,15-0,17) дБ, что в процентном выражении составляет (3-4)%, поэтому

Далее, выражая в общем случае $l dl$ с учетом обозначений, приведенных на рисунке 2, можно записать:

$$l dl = \sigma \left[\operatorname{tg} \theta_u + \operatorname{tg}(\theta_u + 2\beta) \right] \left\{ \frac{d\sigma}{d\theta_u} \left[\operatorname{tg} \theta_u + \operatorname{tg}(\theta_u + 2\beta) \right] + \sigma \left[\frac{1}{\cos^2 \theta_u} + \frac{1 + 2 \left(\frac{\partial \beta}{\partial \theta_u} \right)}{\cos^2(\theta_u + 2\beta)} \right] \right\} d\theta_u = \eta(\sigma, \theta_u) d\theta_u.$$

В результате полный световой поток, принятый ППК оптической насадки от одной элементарной излучающей площадки dS_u с учетом всех лучей индикатрисы излучения $J(\theta_u)$ и с учетом индикатрисы $T(\theta_{np})$ рассеяния, определится выражением:

$$\Delta\Phi_{np} = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} d\varphi \int_{\theta_{u,\min}(\varphi)}^{\theta_{u,\max}(\varphi)} T(\theta_u + 2\beta) \frac{J(\theta_u)}{s^2} \cos(\theta_u + 2\beta) \eta(\sigma, \theta_u) d\theta_u.$$

Дальнейшее суммирование по всем элементарным излучающим площадкам ППК даст искомый световой поток, попадающий в конечном итоге, на фотоприемник:

$$\Phi_{np} = \eta \int_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi} d\alpha \int_{\rho_{\min}(\alpha)}^{\rho_{\max}(\alpha)} \Delta\Phi_{np} \rho d\rho, \text{ где } \eta = \frac{\Delta S_u}{\pi r^2} \text{ учитывает количество элементарных излучающих площадок, соотношенных с общей площадью ППК, при равномерном его разбиении на элементарные площадки.}$$

Если в качестве фотоприемника используются полупроводниковые структуры, обладающие внутренним фотоэффектом, то генерируемый фототок прямо пропорционален интенсивности освещения. В частности для современных фотодиодных структур [21] фототок в мкА: $I_{\varphi} \approx 10^6 \Phi_{np}$.

Разработанная математическая модель формирования информационного светового потока оптоэлектронного дискретно-фазового преобразователя геометрии поверхности лопаток газотурбинного двигателя, реализована далее в алгоритме численного интегрирования для вычисления потока, попадающего на фотоприемник.

Алгоритм реализован в виде программы математического моделирования в пакете *MATLAB*. В программе учтены исходные данные и граничные условия, используемые в рассматриваемой модели. В итоге, после каждого полного цикла расчетов для текущего значения координаты оси вращающейся OH (X_L , Y_L) и на каждом угле поворота γ OH на печать выводятся следующие данные: координаты отражающей точки (X_B , Y_B), т.е. значение профиля Y_B боковой поверхности лопатки в точке X_B , текущий угол γ и сформированный световой поток $\Phi_{np}(\gamma)$. Графический вид формы нормированных сигналов фотоприемника приведен

этими потерями в первом приближении можно пренебречь [20]. Учитывая, что площадь элементарной (бесконечно малой) приемной площадки в полярных координатах: $\Delta S_{np} \approx dS_{np} = l dl d\varphi$, то суммарный световой поток всех лучей, излученных одной элементарной излучающей площадкой, и принятый всеми элементарными приемными площадками ППК в общем случае можно записать в виде:

$$\Delta\Phi_{np} = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} d\varphi \int_{l_u(\varphi)}^{l_{np}(\varphi)} T(\theta_{np}) \frac{J(\theta_u)}{s^2} \cos \theta_{np} l dl.$$

на рисунке 3, где показано угловое положение максимума импульса в трех точках профиля поверхности лопатки с различной кривизной: левый график – с отрицательной, средний – с нулевой и правый график – с положительной.

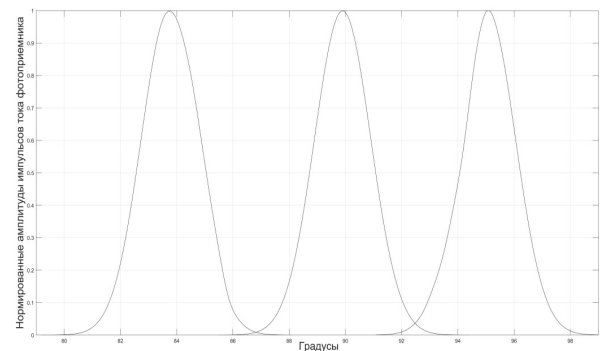


Рисунок 3 – Расчетная форма сигнала фотоприемника, полученная при отражении зондирующего светового потока в трех точках профиля лопатки с различной кривизной боковой поверхности

Заключение. Анализируя результаты расчетов, выполненных на основании полученных аналитических выражений, можно сделать следующие выводы:

1. Математическая модель адекватно, не нарушая положений геометрической оптики и фотометрии, описывает формирование выходного сигнала ОЭДФП геометрии поверхности лопаток ГТД и позволяет количественно оценить влияние сопутствующих факторов на формирование информационного сигнала.

2. Выходной сигнал фотоприемника имеет колоколообразную форму.

3. Положение максимума выходного импульса фотоприемника определяется кривизной отражающей боковой поверхности лопатки и соответствует углово-

му положению ОН, когда ее ось перпендикулярна плоскости касательной к точке отражения зондирующего луча на поверхности лопатки.

4. Амплитуда выходного сигнала уменьшается при увеличении установочных расстояний между осью оптической насадки и базовой опорной плоскостью.

5. Амплитуда выходного сигнала фотоприемника увеличивается при увеличении диаметра ППК ОН.

6. В зависимости от кривизны отражающей поверхности наблюдается искажение симметрии импульса фотоприемника, выражающееся в различной крутизне и длительности фронтов выходного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. ОСТ 1 02571-86. Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения размеров, формы и расположения пера. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 36 с.

2. ГОСТ 23557-79. Лопатки авиационных осевых компрессоров и турбин. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1979. – 30с.

3. Иноземцев А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник для студентов специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки». Серия «Газотурбинные двигатели» [Текст] / М.А. Нихамкин, В.Л.Сандрацкий. М.: Машиностроение, 2007. 396 с.

4. Крымов В.В. Производство лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К. И. Зудин. – М.: Машиностроение, 2002. – 376 с.

5. Ионов А.В. Создание на основе CALS-технологий универсальной автоматизированной системы управления технологической подготовкой производства лопаток компрессора ГТД: дис. ... канд. техн. наук. М: МАИ, 2014. 126 с.

6. Кеткович А.А., Яковлева Н.И. Лазерная компьютерная система контроля лопаток газотурбинных двигателей ПКПЛ-1 // Контроль. Диагностика № 3,2007. М., Машиностроение. с. 32–34.

7. Чичигин Б.А. Разработка методов и средств лазерного контроля геометрии лопаток газотурбинных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: М:МЭИ, 2007. – 147 с.

8. Яковлев М.Г. Современные проблемы автоматизации обработки пера лопаток авиационных двигателей / М.Г. Яковлев, М.В. Жуплов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2011. – №1. – с. 132–138.

9. Дёмкин В.Н. Лазерные методы и средства измерения геометрии поверхностей сложной формы : диссертация ... доктора технических наук : 05.11.07. – Москва, 2004. – 247 с. : ил.

10. Вайнберг Э.И. Компьютерные томографы для неразрушающего контроля и количественной диагностики изделий аэрокосмической промышленности / Э.И. Вайнберг и др. – М.: Двигатель, 2008. №2 (56), С. 19–23.

11. Гузевич С. Н. О стереоскопическом методе измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 7. С. 543–549.

12. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Соифера. М.: Физматлит, 2003. -784с.

13. Патент на изобретение 2548939 Российская Федерация, МПК G01B 21/22. Способ определения угловых положений поверхности объекта и устройство для его осуществления. Данилин А.И., Данилин С.А., заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. Заявл. 1.07.2013, опубл. 20.04.2015, бюл. №11.

14. Патент на изобретение 2555505 Российская Федерация, МПК G01B 11/26. Устройство определения угловых положений поверхности объекта. Данилин А.И., Данилин С.А., заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. Заявл. 04.07.2012, опубл. 10.07.2015, бюл. №19.

15. Данилин С.А. Чернявский А.Ж. Волоконно-оптический преобразователь с увеличенным динамическим диапазоном измерения для мониторинга изменений профиля поверхности изделий машиностроения // Известия Самар. науч. центра РАН, 2016. том 18. – № 4–1. – С. 166–169.

16. Данилин А.И. Бесконтактные измерения деформационных параметров лопаток в системах контроля и управления турбоагрегатами. Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2008. 218 с.

17. Зак Е.А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией / Е.А. Зак – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.

18. Гуревич М.М. Фотометрия: теория, методы и приборы/М.М.Гуревич – Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.

19. Якушников Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для студентов вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 1999. – 480 с.: ил.

20. Воронин В.Г. Интегральные потери в элементах волоконно-оптических линий связи./ В.Г. Воронин, О.Е.Наний, А.Н. Туркин, В.И. – М.: 2012. – 51 с.: ил.

21. Гаман В. И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. – Томск: НТЛ, 2000. – 426 с

Статья поступила в редакцию 13.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 624.071.22:531.62

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0023

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НИТЕЙ КОНЕЧНОЙ ЖЕСТКОСТИ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© 2021

Тарасов Денис Александрович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Автоматизация и управление»

Волков Владимир Васильевич, кандидат технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Автоматизация и управление»

Аксенова Елена Александровна, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и управление»

*Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11,
e-mails: tarasov.denis.penza@gmail.com, volkovv@penzgtu.ru, nsn@penzgtu.ru)*

Аннотация. Предложена методика, позволяющая моделировать при действии поперечной кратковременной динамической нагрузки напряженно-деформированное состояние нитей, обладающих некоторой изгибной жесткостью. Исследования проведены на основе общей теоремы динамики, а именно закона сохранения энергии, а также положений сопротивления материалов, математического моделирования с использованием аппарата дифференциального и интегрального исчисления функций одной и нескольких переменных. В результате расчета кроме распределения напряжений и деформаций по длине нити определяется значение эквивалентной статической нагрузки удару, возникающему за счет кинетической энергии ударяющего тела, взаимодействующего с конструкцией. Данная нагрузка ограничена исходным количеством кинетической энергии тела, а ее величина и закон изменения от времени зависят от физических и геометрических параметров нити конечной жесткости. Использование в проектно-конструкторской деятельности разработанной методики позволит корректно решать задачи по расчету элементов, моделью которых является нить, обладающая некоторой изгибной жесткостью. Это повысит надежность изделий разработанных с применением таких элементов. Вместе с тем может привести к более широкому внедрению конструкций, работающих преимущественно на растяжение с частичным восприятием изгибающих моментов при обеспечении общей прочности той или иной механической системы при внешнем воздействии.

Ключевые слова: изгибная жесткость, нить, удар, напряжения, деформации.

MATHEMATICAL MODELING OF THE OPERATION OF BENDED RIGID THREADS UNDER IMPACT

© 2021

Tarasov Denis Aleksandrovich, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department "Automation and Control"

Volkov Vladimir Vasilievich, candidate of technical sciences, professor,
head of the Department "Automation and Control"

Aksenova Elena Aleksandrovna, senior lecturer of the Department "Automation and Control"

*Penza State Technological University
(440039, Russia, Penza, Baidukova proezd / ul. Gagarina, 1a/11,
e-mails: tarasov.denis.penza@gmail.com, volkovv@penzgtu.ru, nsn@penzgtu.ru)*

Abstract. A technique is proposed that makes it possible to simulate the stress-strain state of threads with a certain bending stiffness under the action of a transverse short-term dynamic load. The studies were carried out on the basis of the general theorem of dynamics, namely the law of conservation of energy, as well as the provisions of the resistance of materials, mathematical modeling using the apparatus of differential and integral calculus of functions of one and several variables. As a result of the calculation, in addition to the distribution of stresses and strains along the length of the thread, the value of the equivalent static load to the impact arising from the kinetic energy of the impacting body interacting with the structure is determined. This load is limited by the initial amount of kinetic energy of the body, and its value and the law of change with time depend on the physical and geometric parameters of the thread of finite rigidity. The use of the developed methodology in design and development will allow to correctly solve the problems of calculating elements, the model of which is a thread with a certain bending stiffness. This will increase the reliability of products designed using such elements. At the same time, it can lead to a wider introduction of structures operating mainly in tension with partial perception of bending moments while ensuring the overall strength of a particular mechanical system under external influence.

Keywords: bending stiffness, thread, impact, stresses, deformations.

Введение. На сегодняшний день вопросы математического моделирования работы гибких нитей при действии произвольных поперечных нагрузок достаточно широко освящены [1, 2]. Гибкая нить является

расчетной моделью для несущих элементов таких механических систем как контактные провода электрифицированных железных дорог, стальные канаты воздушных линий электропередач, канатных дорог и

кабель-кранов [3, 14]. Однако техническая сложность реализации опорных и узлов сопряжения, а также ограниченная доступность стальных канатов ведет к их замене горячекатаными профилями. Это особенно актуально для ограждений безопасности автомобильных дорог и противотаранных ограждений территорий особо важных объектов, где высока вероятность наезда транспортных средств [4, 5]. В указанных инженерных сооружениях в качестве конструкций, обеспечивающих общую прочность изделий при ударном воздействии, часто используют стальные полосы, прямоугольные профили и двутавры хорошо работающие как на растяжение, так и на изгиб. В связи с этим гибкая нить, способная воспринимать только растягивающие усилия, не может выступать в качестве расчетной модели, поскольку не отражает реальной работы перечисленных элементов. Таким образом, для определения истинных напряжений и деформаций необходимо рассматривать нить с учетом изгибной жесткости [6].

Целью данного исследования является разработка методики, позволяющей моделировать работу при ударном воздействии нитей, обладающих некоторой изгибной жесткостью.

Материалы и результаты исследования. Рассмотрим нить конечной жесткости пролетом l , подверженной горизонтальному поперечному удару телом, имеющим массу m и скорость v в первоначальный момент соударения [7]. В процессе удара скорость за очень короткий промежуток времени изменяется и в конце взаимодействия падает до нуля, следовательно, на ударяющее тело действует кратковременная сила инерции [8]. По закону равенства действующих и противодействующих сил на нить передается такая же сила, но обратно направленная, обозначим ее q [9]. Расчетная модель представлена на рисунке 1.

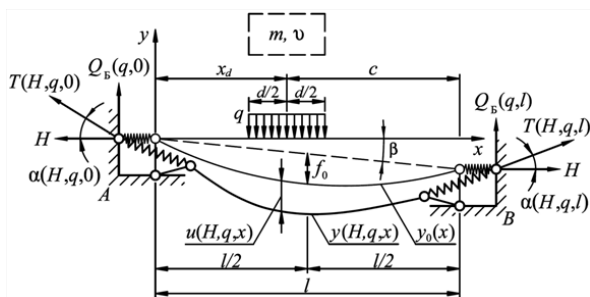


Рисунок 1 – Расчетная модель изгибно-жесткой нити

Нити конечной жесткости являются конструктивными элементами способными при внешнем силовом воздействии воспринимать, как растягивающие усилия, так и изгибающие моменты, иначе говоря, совмещать работу гибкой нити и балки [10]. Если рассматривать гибкую нить, то любая нагрузка заставляет ее принимать очертание эпюры изгибающих моментов шарнирно опертой однопролетной балки тем же пролетом и нагруженной точно так же, как и рассматриваемый элемент [11-13]. В связи с этим внутренние усилия, возникающие от силы инерции, приложенной в виде нагрузки q , будем называть «балочными» и обозначать с индексом «Б». В свою очередь нить,

обладающая изгибной жесткостью, сопротивляется принимать указанное очертание, поскольку воспринимает часть «балочного» момента. Поэтому ту часть внутренних усилий, которую воспринимает нить конечной жесткости, условимся обозначать с индексом «Н».

Допустим, что кинетическая энергия ударяющего тела переходит полностью в потенциальную энергию деформации изгибно-жесткой нити:

$$\Delta \left(\frac{m \cdot v^2}{2} \right) = \int_0^l \frac{M_H(H, q, x)^2}{2 \cdot E \cdot J} dx + \int_0^l \frac{T(H, q, x)^2}{2 \cdot E \cdot A} dx + \int_0^l \frac{k \cdot Q_B(H, q, x)^2}{2 \cdot G \cdot A} dx \quad (1)$$

где l – пролет, м; $M_H(H, q, x)$ – функция изгибающего момента, Н·м; E – модуль упругости, Па; J – момент инерции сечения, м⁴; $T(H, q, x)$ – функция растягивающего продольного усилия, Н; A – площадь поперечного сечения, м²; k – коэффициент характеризующий форму поперечного сечения; $Q_B(H, q, x)$ – функция поперечной силы, Н; G – модуль сдвига, Па.

В уравнении (1) в параметры функций внутренних усилий добавлена статическая нагрузка q – эквивалент силы инерции ударяющего тела. Это обусловлено тем, что неизвестно время соударения, а значит величина ускорения и соответственно силы инерции. Вместе с тем в параметры функций добавлен распор H – горизонтальная составляющая растягивающего нить продольного усилия, так как он также неизвестен на момент взаимодействия.

Момент, возникающий в изгибно-жесткой нити, можно определить с помощью приближенной теории изгиба прямолинейных брусьев [15]:

$$M_H(H, q, x) = E \cdot J \cdot \frac{d^2}{dx^2} u(H, q, x), \quad (2)$$

где $u(H, q, x)$ – функция перемещений, м.

Известно, что существует дифференциальная зависимость между изгибающим моментом и поперечной силой [16]:

$$Q_B(H, q, x) = \frac{d}{dx} M_H(H, q, x). \quad (3)$$

В любой точке по длине нити конечной жесткости растягивающее продольное усилие равно сумме проекций балочной поперечной силы и распора на касательную к линии конечного очертания. Математически это записывается так:

$$T(H, q, x) = Q_B(q, x) \cdot \sin \alpha(H, q, x) + H \cdot \cos \alpha(H, q, x), \quad (4)$$

где $Q_B(q, x)$ – функция балочной поперечной силы, Н; $\alpha(H, q, x)$ – угол между касательной в произвольной точке к линии конечного очертания изгибно-жесткой нити и осью абсцисс, град.

Функции балочной поперечной силы и балочного изгибающего момента от инерционной нагрузки и координаты представим в виде [17]:

$$Q_B(q, x) = \frac{q \cdot d \cdot c}{l} \cdot (x \geq 0) - q \cdot \left[x - \left(x_d - \frac{d}{2} \right) \right] \cdot \left(x > x_d - \frac{d}{2} \right) + ; + q \cdot \left[x - \left(x_d + \frac{d}{2} \right) \right] \cdot \left(x > x_d + \frac{d}{2} \right) \quad (5)$$

$$M_B(q, x) = \frac{q \cdot d \cdot c}{l} \cdot x \cdot (x \geq 0) - q \cdot \frac{\left[x - \left(x_d - \frac{d}{2} \right) \right]^2}{2} \cdot \left(x > x_d - \frac{d}{2} \right) + q \cdot \frac{\left[x - \left(x_d + \frac{d}{2} \right) \right]^2}{2} \cdot \left(x > x_d + \frac{d}{2} \right) \quad (6)$$

где d – ширина зоны соударения, м; c – расстояние от центра зоны соударения до опоры B , м; x_d – абсцисса центра зоны соударения, м.

Тригонометрические функции угла между касательной в произвольной точке к линии конечного очертания изгибно-жесткой нити и осью абсцисс определяются по выражениям:

$$\sin \alpha(H, q, x) = \frac{\frac{d}{dx}(y(H, q, x) - x \cdot \operatorname{tg} \beta)}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx}(y(H, q, x) - x \cdot \operatorname{tg} \beta) \right)^2}}; \quad (7)$$

$$\cos \alpha(H, q, x) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx}(y(H, q, x) - x \cdot \operatorname{tg} \beta) \right)^2}}; \quad (8)$$

где $y(H, q, x)$ – функция линии конечного очертания, м; β – угол наклона хорды AB , соединяющей точки крепления, град.

Из расчетной модели, представленной на рисунке 1 видно, что функция линии конечного очертания равна сумме двух слагаемых:

$$y(H, q, x) = y_0(x) + u(H, q, x), \quad (9)$$

где $y_0(x)$ – функция линии начального очертания, м.

Линия начального очертания представляет собой квадратичную функцию [18]:

$$y_0(x) = \frac{4 \cdot f_0}{l^2} \cdot x^2 - \frac{4 \cdot f_0}{l} \cdot x, \quad (10)$$

где f_0 – первоначальная стрела провеса, м.

Для нахождения функции перемещений запишем уравнение моментов, взятое в произвольном сечении по длине изгибно-жесткой нити:

$$E \cdot J \cdot \frac{d^2}{dx^2} u(H, q, x) - M_B(q, x) + H \cdot (y_0(x) + u(H, q, x)) = 0 \quad (11)$$

Для раскрытия неопределенности относительно распора и создания возможности для дальнейшего решения дифференциального уравнения (11) относительно перемещений, воспользуемся условием совместности деформаций, связывающим длины нити в деформированном и исходном состоянии [19]:

$$L_0 + \Delta L(H, q) = L(H, q), \quad (12)$$

где L_0 – начальная длина, м; $\Delta L(H, q)$ – упругая деформация, м; $L(H, q)$ – конечная длина, м.

Длина нити конечной жесткости до приложения нагрузки равна:

$$L_0 = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx}(y_0(x) - x \cdot \operatorname{tg} \beta) \right)^2} dx. \quad (13)$$

В результате ударного воздействия происходит удлинение на величину:

$$\Delta L(H, q) = \frac{H}{E \cdot A} \times \int_0^l \left[1 + \left(\frac{Q_B(q, x) - Q_H(H, q, x)}{H} + \operatorname{tg} \beta \right)^2 \right] dx. \quad (14)$$

Длина в деформированном состоянии определяется по выражению:

$$L(H, q) = \int_0^{l - \frac{2}{k} H} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx}(y(H, q, x) - x \cdot \operatorname{tg} \beta) \right)^2} dx, \quad (15)$$

где k – жесткость упругоподатливых опор, Н/м.

После того как решена одним из численных методов система, состоящая из двух трансцендентных уравнений (1) и (12) с двумя неизвестными, появляется возможность определить нормальные напряжения, возникающие в изгибно-жесткой нити.

Минимальные нормальные напряжения равны:

$$\sigma_{\min}(x) = \frac{T(H, q, x)}{A} - \left| \frac{M_H(H, q, x)}{W} \right|, \quad (16)$$

где W – момент сопротивления сечения, м³.

Максимальные нормальные напряжения определяются по выражению:

$$\sigma_{\max}(x) = \frac{T(H, q, x)}{A} + \left| \frac{M_H(H, q, x)}{W} \right|. \quad (17)$$

Заключение. Использование в проектно-конструкторской деятельности разработанной методики и реализованной с помощью численных схем решения в виде проблемно-ориентированного программного комплекса [20], позволит корректно решать задачи по расчету элементов, моделью которых является нить, обладающая некоторой изгибной жесткостью. Это повысит надежность изделий разработанных с применением таких элементов. Вместе с тем может привести к более широкому внедрению конструкций, работающих преимущественно на растяжение с частичным восприятием изгибающих моментов при обеспечении общей прочности той или иной механической системы при внешнем воздействии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Тарасов, Д. А. Алгоритм моделирования поведения вращающейся гибкой нити в упругопластическом состоянии / Д. А. Тарасов, Н. Ю. Митрохина, Э. М. Эркебаев // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2021. – № 1(37). – С. 107-118. – DOI 10.21685/2227-8486-2021-1-9.
2. Кужахметова, Э. Р. Методы расчета вант и вантовых конструкций / Э. Р. Кужахметова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 2. – С. 39-48. – DOI 10.12737/article_5c73fc07ba7858.43737360.
3. Патент № 2694376 С1 Российская Федерация, МПК E06B 3/46, E06B 5/10, E06B 11/02. Противотаранные откатные ворота : № 2019102145 : заявл. 24.12.2018 : опубл. 12.07.2019 / А. А. Кодоров, Д. А. Тарасов, Г. С. Большаков [и др.] ; заявитель Закрытое акционерное общество "Центр специальных инженерных сооружений научно-исследовательского и конструкторского института радиоэлектронной техники" (ЗАО "ЦЕСИС НИКИРЭТ").
4. Патент на полезную модель № 191852 U1 Российская Федерация, МПК E01F 15/02, E04H 17/16. Противотаранное ограждение : № 2019113635 : заявл. 30.04.2019 : опубл. 26.08.2019 / Д. А. Тарасов, Г. С. Большаков, И. В. Васильев, О. Л. Шаповал ; заявитель Закрытое акционерное общество "Центр специальных инженерных сооружений научно-исследовательского и конструкторского института радиоэлектронной техники" (ЗАО "ЦЕСИС НИКИРЭТ").
5. Патент № 2668118 С1 Российская Федерация, МПК E01F 13/00. Габион : № 2017140743 : заявл. 22.11.2017 : опубл. 26.09.2018 / И. В. Васильев, В. А. Сигаев, Д. А. Тарасов, О. Л. Шаповал ; заявитель Закрытое акционерное общество "Центр специальных инженерных сооружений научно-исследовательского и конструкторского института радиоэлектронной техники" (ЗАО "ЦЕСИС НИКИРЭТ").
6. Захарова, Л. В. Об алгоритме вариационного метода для расчета упругой непологой нити с учетом изгибной жесткости / Л. В. Захарова, М. В. Александровский // Вест-

ник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 10. – С. 84-89. – DOI 10.12737/article_59cd0c5bd4bef4.35068893.

7. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния гибкой нити при действии поперечного удара / В. В. Коновалов, Д. А. Тарасов, В. Ю. Зайцев, Ю. В. Родионов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : Труды XXI Международной конференции. В 2-х томах, Самара, 03–06 сентября 2019 года / Под редакцией С.А. Никитова, Д.Е. Быкова, С.Ю. Боровика, Ю.Э. Плешивцевой. – Самара: Общество с ограниченной ответственностью "Офорт", 2019. – С. 313-317.

8. Mathematical Modeling of the Stress-Strain State of a Flexible Thread under the Action of Transverse Impact / V. Konovalov, V. Zaitsev, D. Tarasov, Y. Rodionov // Proceedings - 2019 21st International Conference "Complex Systems: Control and Modeling Problems", CSCMP 2019, Samara, 03–06 сентября 2019 года. – Samara: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 470-474. – DOI 10.1109/CSCMP45713.2019.8976590.

9. Effect of deformation on the stress-strain state of a honey extraction centrifuge flexible thread / D. Tarasov, V. Konovalov, V. Zaitsev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH 2019, Rostov-on-Don, 10–13 сентября 2019 года. – Rostov-on-Don: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012118. – DOI 10.1088/1755-1315/403/1/012118.

10. Кауров, П. В. Новый способ определения перемещений стержня малой жесткости при продольно-поперечном изгибе / П. В. Кауров, А. А. Тимофеев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2011. – № 1(26). – С. 163-171.

11. Mathematical modeling of deformations of flexible threads under their dynamic loading in the zone of material plasticity / D. Tarasov, V. Konovalov, V. Zaitsev, Y. Rodionov // Journal of Physics: Conference Series, Tambov, 14–16 ноября 2018 года. – Tambov: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012014. – DOI 10.1088/1742-6596/1278/1/012014.

12. Тарасов, Д. А. Исследование влияния пластических деформаций при моделировании напряженно-деформированного состояния гибкой нити / Д. А. Тарасов, А. В. Липов, А. М. Ирышков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1(33). – С. 98-110. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-8.

13. Компьютерное моделирование определения реакций опор гибких барьеров / В. В. Коновалов, Д. А. Тарасов, В. Ю. Зайцев, Н. В. Байкин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2012. – № 3. – С. 72-79.

14. Тарасов, Д. А. Конструкция защитного сооружения от удара для железнодорожных переездов / Д. А. Тарасов, В. В. Коновалов, В. Ю. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 1. – С. 111-117.

15. Аверин, А. Н. Малые колебания жесткой нити вблизи статического положения равновесия / А. Н. Аверин // Строительная механика и конструкции. – 2018. – № 2(17). – С. 53-66.

16. Mathematical modeling of the stress-strain state of flexible threads with regard to plastic deformations / D. Tarasov, V. Konovalov, V. Zaitsev, Y. Rodionov // Journal of Physics: Conference Series: 4, Tambov, 15–17 ноября 2017 года. – Tambov, 2018. – P. 012008. – DOI 10.1088/1742-6596/1084/1/012008.

17. Тарасов, Д. А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния гибких нитей с учетом физической нелинейности / Д. А. Тарасов, Д. Ю. Семенов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 3(23). – С. 175-185.

18. Tarasov, D. Modeling the stress state of a rotating flexible thread (cable) to optimize its speed / D. Tarasov, V. Konovalov, V. Zaitsev // Journal of Physics: Conference Series, Voronezh, 10–13 декабря 2019 года. – Voronezh, 2020. – P. 012089. – DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012089.

19. Виселева, Ю. О. Расчет жесткой нити методом Бубнова - Галеркина / Ю. О. Виселева, Е. В. Глыбина // Избранные доклады 60-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 24–25 апреля 2014 года / Томский государственный архитектурно-строительный университет. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. – С. 412-415.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667618 Российская Федерация. Программа моделирования работы изгибно-жестких нитей в упругопластическом состоянии при воздействии статических и динамических нагрузок : № 2020667024 : заявл. 18.12.2020 ; опубл. 25.12.2020 / Д. А. Тарасов, П. А. Косяков, А. Л. Данилов, О. Л. Шаповал ; заявитель Закрытое акционерное общество «Центр специальных инженерных сооружений научно-исследовательского и конструкторского института радиоэлектронной техники» (ЗАО «ЦеСИС НИКИРЭТ»).

Статья поступила в редакцию 17.10.2021
Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 663.41

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0024

ВЛИЯНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ПИВА НА ФОРМИРОВАНИЕ ЦВЕТА

© 2021

Грибкова Ирина Николаевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник*Всероссийский научно-исследовательский институт пивоваренной, безалкогольной и винодельческой промышленности – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН
(119021, Россия, Москва, улица Россолимо, д. 7, e-mail: institut-beer@mail.ru)***Елисеев Михаил Николаевич**, доктор технических наук, профессор*Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова
(117997, Российская Федерация, г.Москва, Стремянный пер., 36, e-mail: michail_eliseev@mail.ru)*

Аннотация. Приведен аналитический обзор соединений, участвующих в образовании окраски пивоваренной продукции, а также методов ее определения. Установлено, что вклад в развитие окраски пива принадлежит полифенолам, меланоидинам, ионам металлов, некоторым витаминам и зависит от сырья и технологических условий производства. Приведен подробный состав полифенольных соединений, участвующих в образовании цвета продукции, как наиболее весомых по количественному признаку. Показано наиболее весомое влияние на развитие окраски катехинов и проантоцианидинов растительного сырья, применяемого в технологии пивоварения. Оценена роль ионов Fe^{2+} и Cu^{2+} относительно влияния на развитие темного окрашивания вследствие их высокой способности к хелатированию. Оценено влияние рибофлавина на развитие окраски светлых сортов пива. Рассмотрены системы оценки цветовых характеристик в отечественной и зарубежной пивоваренной отрасли. Приведены и оценены спектрофотометрические и другие методы измерения цветовых характеристик пива в рамках оценки качественных параметров. Установлены недостатки в оценке цветовых характеристик вследствие применения неполного спектра длин волн, что позволяет говорить об актуальности проведения исследовательских работ в этой области с целью изменения методологической базы оценки качественных параметров пивоваренной продукции.

Ключевые слова: пиво, формирование цвета, полифенолы, меланоидины, спектрофотометрические методы определения

THE BEER COMPOUNDS INFLUENCE ON COLOR FORMATION

© 2021

Gribkova Irina Nikolaevna, candidate of technical sciences, senior researcher*All-Russian Research Institute of the brewing, non-alcoholic and wine-making industry
A branch of the FSBI "FNT food systems them. V.M. Gorbатов" RAS
(119021, Russia, Moscow, Rossolimo St., 7, e-mail: institut-beer@mail.ru)***Eliseev Michail Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor*Russian University of Economics. G.V. Plekhanov
(117997, Russia, Moscow, Stremyanniy lane, 36, e-mail: michail_eliseev@mail.ru)*

Abstract. An analytical review of the brewing products color compounds formation involved, as well as methods for its determination is given. It has been established that the contribution to the development of beer color belongs to polyphenols, melanoidins, metal ions, some vitamins and depends on raw materials and technological conditions of production. The detailed composition of polyphenolic compounds participating in the formation of product color, as the most significant in terms of quantitative characteristics, is given. The most significant influence on the color development of catechins and proanthocyanidins of plant raw materials used in brewing technology is shown. The Fe^{2+} and Cu^{2+} ions role in relation to their influence on the dark coloration development due to their high ability to chelate was evaluated. The influence of riboflavin on the color development of light beers has been assessed. The systems for assessing color characteristics in the domestic and foreign brewing industry are considered. The spectrophotometric and other methods of measuring the color characteristics of beer in the framework of the assessment of qualitative parameters are presented and evaluated. Disadvantages in the assessment of color characteristics due to the use of an incomplete spectrum of wavelengths have been established, which allows us to speak about the relevance of research work in this area in order to change the methodological base for assessing the quality parameters of brewing products.

Keyword: beer, color formation, polyphenols, melanoidins, spectrophotometric determination methods.

Введение. В последнее время требования к качеству продуктов питания, в частности пива, возросли в связи с экономическими требованиями стран ЕвразЭС. Это связано с желанием гармонизировать требования к отечественной продукции на территории Евразийского Сообщества и сделать продукцию конкурентноспособной на европейском рынке.

Большое значение имеет методическая база, посредством которой будут оцениваться качественные показатели пивоваренной продукции – она должна быть также гармонизирована в соответствии с требованиями Европейской пивоваренной конвенции и Аналитической комиссии по пивоварению Центральной Европы (МЕВАК). Прежде всего, необходимо

точно определиться, какие соединения ответственны за образование цвета или окраски пивоваренной продукции.

Установлено, что соединения, формирующие цвет пива – это меланоидины, карамели, полифенолы, ионы металлов, таких как медь и железо, и кофермент биохимических процессов рибофлавин [1-3].

Меланоидины, как известно, являются водорастворимыми пигментами, цвет которых находится в диапазоне от желтого до темно-коричневого [4]. Формируются меланоидины в основном при производстве солода на стадии сушки и отсушки готового солода в условиях высоких температур при реакции Майяра между моно-, ди- и трисахарами и аминокислотами [5]. Карамели образуются в результате реакции карамелизации при температурах выше 120°C и зависят от pH и типа сахара [6]. Также карамелизация может происходить в условиях финальной стадии приготовления солода.

Полифенольные соединения оказывают разностороннее влияние на качество пива, потому что вследствие многочисленности форм они влияют на образование аромата, вкуса, цвета и помутнений в технологии [7-10].

Ионы металлов меди и железа присутствуют в пиве в составе коллоидов (белков, сахаридов, полифенолов), встречаются в составе соединений, ответственных за помутнения [11]. Помимо включения в состав полифенолов, ионы меди выступают катализатором синтеза перекисей в присутствии кислорода воздуха, способствует прохождению реакции распада сахаридов при нагревании, что влияет на стабильность пива [11].

Содержание рибофлавина в безалкогольном пиве доходит до 0,11 мг/дм³, а в пиве, содержащем алкоголь, достигает 0,3-1,3 мг/дм³ [12]. Сам по себе рибофлавин окрашен в ярко-оранжевый цвет, что, несомненно, может влиять на вклад данного соединения в образование цвета пива. Рибофлавин имеет солодовое происхождение, хмель и дрожжи незначительно вносят вклад в его содержание [13].

Исследование проблемы влияния соединений растительного сырья на цвет готового пива является

перспективным направлением в современном пивоварении с точки зрения выявления путей влияния того или иного соединения на цвет, а также разработку или уточнение методики для оценки интенсивности цвета для гармонизации методов определения качества пива с европейскими стандартами.

Целью работы являлось теоретическое обоснование и анализ степени влияния соединений растительного сырья пива на формирование цветовых характеристик готового пива.

Материалы и результаты исследований. Материалами для исследования послужили научные и аналитические данные зарубежных и отечественных источников информации.

В качестве методов исследования использовались мониторинг и анализ источников информации, их систематизация и обобщение для осуществления подведения итогов проведенной исследовательской работы.

Необходимо рассмотреть вопрос количественного содержания цветоформирующих соединений в составе пива, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание соединений в пиве, влияющих на образование цвета [5, 14-17]

Перечень основных соединений	Содержание, мг/дм ³
Меланоидины	0,61-0,49
Полифенолы	до 800
Ионы металлов:	
- медь	около 0,06
- железо	0,63-1,20
Рибофлавин	до 1,3

Как видно из данных таблицы 1, что в перечне отсутствуют данные по содержанию карамелей в пиве. На самом деле, исследователи часто используют оценку интенсивности цвета в единицах ЕВС вместо количественной оценки содержания карамелей в пиве по причине проблематичности их выделения [18].

По значимости минорных соединений, судя по данным таблицы 1, первое место принадлежит полифенольным соединениям.

На рисунке 1 представлены виды, а в таблице 2 – характеристика полифенольных соединений пива.

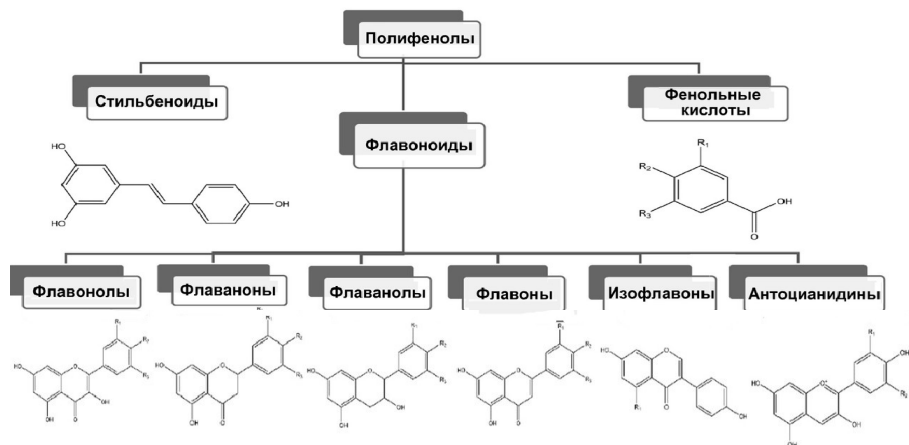


Рисунок 1 – Классификация и строение полифенольных соединений пива [19, 20].

Таблица 2 – Характеристика фенольных соединений в пиве [21–31]

Класс фенолов	Группа	Соединения	Источник, соотношение	Участие в образовании		Концентрация, мг/дм ³ , в пиве
				помутнения	цвета	
Мономерные	спирты	тирозол	солод	-	-	3–40
	кислоты и их производные	гидроксibenзойная	солод=хмель	-	-	10–30
		протокатеховая	солод	-	-	
		галловая	солод<хмель	-	-	
		ванильная	солод<хмель	-	-	
		сиреневая	солод<хмель	-	-	
		гентисиковая	солод	-	-	
п-кумаровая		солод<хмель	-	-		
кофейная		солод=хмель	-	-		
феруловая, коричная		солод=хмель	+	+		
синаповая		солод=хмель	-	-		
хлорогеновая	солод=хмель	-	-			
4-винилгваякол и гомологи	солод	+	+			
этилфенол	солод	-	-			
амины	горденин, тирамин, N-метилтирамин, тирозамин, тирозин	солод	-	-	10–20	
флавоноиды, флаван-3-олы (катехины)	(+) катехин, (+) эпикатехин и др. изомеры	солод<хмель	+	+	0,5–13	
пренилфлавоноиды	ксантогумол, изоксантогумол и гомологи	хмель	-	-	0,002–3,5	
антоцианогены	B3, B4 процианидин B3 продельфинидин, процианидин и продельфинидин C	солод<хмель солод>хмель	+	+	4–80	
флавонолы	кемпферол, гликозиды кверцетин, гликозиды мирицетин, гликозиды рутин и др.	хмель	-	-	менее 10	
Конденсированные		димерные катехины	солод, хмель	+	+	5–8
		тримеры	солод, хмель	+	+	менее 1

Данные таблицы 2 свидетельствуют о том, что ответственны за образование цвета наибольшим образом флаван-3-олы и их изомеры, а также антоцианогены.

Флавоноиды характеризуют наличие желтого цвета в продукте [32]. Подобная окраска формируется за счет метилирования или гидроксирования ядра А в составе структуры флавоноида. Отмечено, что различные флавонолы и флавоны выступают в роли пигментов антоцианов [33, 34]. Поэтому представленные в пиве флавонолы в сочетании с проантоцианидинами имеют легкий буроватый цвет за счет их реакции с другими полифенолами, особенно антоцианами, и за счет других ферментативных реакций [35]. Как показали исследования, наряду с флаван-3-олами в окраске пива из мономерных представителей фенольных кислот участвовали коричная и производные 4-винилгваякола [36].

На втором месте по количественному признаку в отношении образования цвета стоят ионы меди и железа (табл. 3).

Установлено, что ионы металлов по причине хелатирующего действия могут связываться с азотистыми и полифенольными соединениями в структуре пива [37, 38].

Ученые установили, что поведение ионов меди в пиве зависит от степени гидрофобности и заряда. Большая часть (74–82%) меди, содержащейся в пиве, находится в остаточной (инертной) фракции, в гидрофобной форме находилась 10–14% всего количества меди в структуре полифенолов, а на катионные части-

цы или свободную Cu приходилось 12–13% от общего ее содержания [39].

Ионы железа способны встраиваться в состав ядра А у полифенолов, что приводит к потемнению окраски пива, и эта реакция была положена в основу методов определения полифенолов [40, 41].

Третье место по количественному признаку относительно формирования цвета пива занимает рибофлавин. Рибофлавин имеет солодовое происхождение, и меняется незначительно в ходе технологических процессов (фильтрации, брожения, осветлении и пастеризации), но чувствителен к свету [42]. Пик поглощения рибофлавина находится на уровне 445 нм, причем наибольшее влияние он оказывает на светлые типы пива [42].

Последнее место по количественному признаку относительно формирования цвета пива принадлежит соединениям с высокой антиоксидантной активностью – меланоидинам и карамелям [4].

Соединения меланоидинов имеют молекулярную массу 10–50 кДа и образуются в результате сахароаминной реакции (реакция Майяра). Интенсивность реакции определяется строением предшественников (аминокислот, пептидов, пептонов, моно-, ди и три-сахаров) и параметрами процесса (соотношением реагирующих веществ, температурой, pH среды, длительностью).

Снижение реакционной активности аминокислот и сахаров в реакции Майяра прослеживается в следующем порядке: – аминокислоты: лизин → глицин →

метионин → аланин → валин → глутамин → фенилаланин → цистин → тирозин; – сахара: ксилоза → арабиноза → глюкоза → лактоза → мальтоза → фруктоза [43].

Установлено, что температура влияет на скорость реакции более значимо – интенсивность реакции нарастает при увеличении показателей температуры в узком диапазоне значений – с 60°C до 90°C, при температуре 140°C образование меланоидинов полностью затухает, так как аминокислоты термически необратимо разрушаются. Оптимальным значением кислотности среды является *pH* от 7 до 8 ед., причем реакция Майяра протекает в широком интервале *pH* от 3 до 10 ед. [44].

Интенсификацией меланоидинообразования можно добиться введением в реактивную среду металлов с переменной валентностью [45].

Реакция Майяра многостадийна – первом этапе происходит образование гликозиламина, не обладающего ни цветом ни запахом, и только на последующих стадиях в зависимости от строения реагирующих соединений образуются разноокрашенные продукты с присутствием различных хромофоров, таких например как 2-[(2-фурил)метилен]-4-гидрокси-5-метил-2Нфуран-3-он, имеющего характерный желтый цвет [46].

Вследствие протекающего комплекса сложных реакций Амадори образуются низкомолекулярные дикарбонильные соединения (2-оксопропаналь), сшивающие молекулы 4-гидрокси-5-метил-3-фуранона с образованием соединений темно-оранжевого цвета [46].

Кроме того, промежуточные продукты 1,2-енолизации в течение всего процесса могут вступать в реакцию с различными аминокислотами с образованием окрашенных соединений: фурфурола с пролином при нагревании способствует образованию вещества с хромофором интенсивно желтого цвета, а с аланином – красного цвета [46]. Фурфурол или 5-гидроксиметилфурфурол с азотистыми соединениями образуются комплексы коричневой окраски молекулярной массой более 50 кДа [46], часто не растворимые в воде, и характеризующиеся сильным поглощением в ультрафиолетовом свете с выраженными восстановительными свойствами [46]. Кроме того, обнаружено присутствие карбонильных соединений (например, пировиноградной кислоты и ее производного – ацетона), редуктонов и дегидроредуктонов, веществ, обладающих сильно выраженными восстанавливающими свойствами [43].

Интересно отметить, что основные продукты реакции меланоидинообразования ответственны только за окраску, и лишь побочные продукты отвечают за вкус и аромат [48].

Стандартный меланоидин содержит гидроксильные, карбонильные и карбоксильные группировки, кратные и эфирные связи, что обуславливает его реакционную способность, выражающуюся в агломерации с другими соединениями коллоидной системы пива [43].

Необходимо отметить, что интенсивность и разно-

образии аромата от продуктов реакции Майяра в пиве ограничено сырьевыми и технологическими особенностями [47]. Так, в зерновом сырье присутствуют из сахаров мальтотриоза, мальтоза, сахароза, глюкоза и фруктоза, аминокислотный ряд представлен шире: 70-80% аминокислот имеют зерновое происхождение, остальные получены в результате жизнедеятельности дрожжей [49].

Проведению реакции Майяра способствует, в основном, стадия и длительность соложения, а также температурные условия сушки солода, а также осветления суслу при кипячении его с хмелем, то есть в условиях *pH* 5,6-5,7 и температуре от 70°C до 100°C в присутствии кислорода в зависимости от особенностей аппаратного оформления стадии охмеления.

Карамелеобразование направлено на реакцию между углеводными остатками, продукты данного процесса полимерны и представлены летучими веществами и группой олигоконденсированных нелетучих углеводов [50]. Показано, что карамелизованная сахароза содержит 3 основных продукта: продукт дегидратации, карамелан $C_{12}H_{18}O_9$; и два полимера, карамелен $C_{36}H_{50}O_{25}$ и карамелин $C_{96}H_{102}O_{51}$ и ряд сопутствующих в виде альдегидов фуранового ряда и меланоидинов, отвечающих за антиоксидантные свойства [51, 52].

В зависимости от типа сахара наибольшей скоростью реакции обладала фруктоза, за ней сахароза, глюкоза, крахмальный сироп и мальтоза. При исследовании влияния температуры было показано, что повышение температуры среды до 110°C способствовало увеличению скорости реакции в 5 раз. Было показано, что *pH* 10 наиболее эффективная кислотность среды для интенсивного карамелеобразования [53].

Реакция карамелеобразования наиболее характерна для специальных типов солодов, поскольку наиболее интенсивно проходит в условиях пониженного содержания воды, таким образом карамели переходят в пиво исключительно из сырья.

Отметим различие градаций в определении типовой принадлежности пива к светлому или темному в России и за рубежом (табл. 3).

Таблица 3 – Градация пива по цвету [54-57]

Цвет, ед. ЕВС	Характеристика цвета пива в зависимости от страны производства	
	Россия	Европа, США
3-6	светлое	от очень светлого до светлого
6-10		от светлого до соломенного
10-18		от соломенного до золотого
18-30		от золотого до медно-красного
30-40	темное	от медно-красного до красно-коричневого
40-80		темно-коричневое
более 80		черное

Как видим, оттенков у светлого и темного типов пива много, поэтому методы определения пива преимущественно спектрофотометрические, однако существуют и другие способы определения цвета пивоваренной продукции – это методы сравнения (окрашенных растворов или цветовых шкал) и пр. [54, 58, 59].

В таблице 4 представлены методы определения

цвета в зависимости от спектрофотометрических характеристик.

Таблица 4 – Спектрофотометрические методы определения цветности пива [60-62]

Наименование методики	Рабочая длина волны, λ, нм	Соединения с максимумом поглощения при данной длине волны
Цвет по ЕВС (Комитет по анализу Европейской пивоваренной конвенции)	430±10	полифенолы, рибофлавин
Цвет по МЕВАК	440±10	
Цвет по отечественной методике	540±10	меланоидины, проантоцианидины, ионы металлов

Данные таблицы 4 свидетельствуют о том, что спектры поглощения некоторых цветообразующих соединений не учтены, например, с максимумом поглощения при $\lambda=600\div750$ нм.

Поэтому некоторые исследователи заявляют, что по имеющимся методикам существует некорректное определение цвета пива – существуют случаи образцов с одинаковыми величинами цветности по ЕВС, но отличающихся разными спектрами пропускания света за пределами рабочей длины волны [63, 64].

Таким образом, необходимо более глубокое исследование веществ, присутствующих в пиве и влияющих на уровень цвета в образцах продукции.

Заключение. Анализ публикационной активности относительно рассматриваемой проблемы выявил несомненный интерес относительно оценки степени влияния различных соединений пива на формирование цвета. Установлена несомненная роль и степень влияния на образование окраски пива такими соединениями, как полифенолы, меланоидины, некоторые витамины, ионы металлов. Оценена роль полифенолов в формировании окраски пива и установлены источники их происхождения. Показан перечень методик по оценке уровня цвета пива и системы градации пивоваренной продукции по цвету. Проведенный аналитический анализ позволил выявить проблему адекватной оценки цветности пива и неточности методик, применяемых при изучении качества пивоваренной продукции, а также необходимости продолжать исследования в этой области для того, чтобы учесть влияние всех соединений, присутствующих в пиве и участвующих в формировании цвета на всех этапах производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- De Schutter D.P., Saison D., Delvaux F., Derdelinckx G. et al. The chemistry of aging beer. In *Beer in Health and Disease Prevention*, 1st ed.; Preedy, V.R., Ed.; Academic Press Inc.: New York, NY, USA, 2008; pp. 375–388.
- Lewis M.J., Bamforth C.W. *Essays in Brewing Science*, 1st ed.; Lewis, M.J., Bamforth, C.W., Eds.; Springer: New York, NY, USA, 2006; pp. 20–27.
- Pozdrik R., Roddick F.A., Rogers P.J., Nguyen T. Spectrophotometric method for exploring 3-methyl-2-butene-1-thiol (MBT) Formation in Lager. // *J. Agric. Food Chem.* 2006. V.5. pp. 6123–6129.
- Солюянова А.А., Ямашев Т.А., Решетник О.А. Условия образования меланоидинов при производстве сиропов. // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17. № 23. С. 273–275.
- Кунце Л. *Технология солода и пива*. СПб.: Профессия, 2001. 911с.
- Park C.W., Kang K.O., Kim W.J. Effects of reaction conditions for improvement of caramelization rate. // *Korean J. Food Sci. Technol.* 1998. V. 30. pp. 983–987.
- Awad P.A., Decloux V., Ferrari M. et al. The Evolution of Volatile Compounds during the Distillation of Cognac Spirit. // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017. V.65. pp. 7736–7748. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02406>.
- Inui T., Tsuchiya F., Ishimaru M. et al. Different beers with different hops. Relevant compounds for their aroma characteristics. // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2013. V.61. no.20. pp. 4758–4764. <https://doi.org/10.1021/jf3053737>.
- Rettberg N., Biendl M., Garbe L.-A. Hop Aroma and Hoppy Beer Flavor: Chemical Backgrounds and Analytical Tools - A Review. // *Journal of the American Society of Brewing Chemists*. 2018. V.76. no 1. pp. 1-20. <https://doi.org/10.1080/03610470.2017.1402574>.
- Козлов В.И., Грибкова И.Н. Влияние полифенолов на качество пива. // *Актуальные вопросы индустрии напитков*. 2018. № 2. С. 74-76. DOI 10.21323/978-5-6041190-3-7-2018-2-74-76.
- Даниловцева А.Б., Царева И.В. Влияние содержания высокомолекулярных соединений на технологические параметры производства пива. // *Пиво и напитки*. № 2. С. 32-36.
- Меледина Т.В., Дедекаев А.Т. Коллоидная стойкость пива: Учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. с. 8-9.
- Пьер Э., Фам А.-Л., Дантюрк М. *Пивоваренная технология: легкое лакомство с историей, географией, производством*. М.: Эксмо, 2019. 128с.
- Duyvis M., Hilhorst R., Laane C., Evans D., Schmedding D. Role of Riboflavin in Beer Flavor Instability: Determination of Levels of Riboflavin and Its Origin in Beer by Fluorometric Apoptin Titration. // *Journal of agricultural and food chemistry*. 2002. V.50. pp. 1548–52. <https://doi.org/10.1021/jf010511k>.
- Rivero D., Pérez S., González M.L. et al. Inhibition of induced DNA oxidative damage by beers: Correlation with the content of polyphenols and melanoidins. // *J. Agric. Food Chem.* 2005. V.53. pp. 3637–3642.
- Zhao H., Li H., Sun G., Yang B. et al. Assessment of endogenous antioxidative compounds and antioxidant activities of lager beers. // *J. Sci. Food Agric.* 2013. V. 93. pp. 910–917.
- Третьяк Л.Н. Проблемы нормирования содержания соединений металлов в пиве. // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2011. Т. 2. № 30-1. С. 281-284.
- Неудачина Л.К., Лебедева Е.Л. Определение ионов меди(II) методом капиллярного зонного электрофореза в виде комплекса с этилендиаминтетрауксусной кислотой. // *Аналитика и контроль*. 2012. Т. 16. № 2. С. 162-168.
- Coghe S., Gheeraert B., Michiels A., Delyvaux F.R. Development of Maillard Reaction Related Characteristics During Malt Roasting. // *J. Inst. Brew.* 2006. V. 112. No2. pp. 148–156.
- Itika Arora, Manvi Sharma, Trygve O. Tollefsbol. Combinatorial Epigenetics Impact of Polyphenols and Phytochemicals in Cancer Prevention and Therapy. // *Int. J. Mol. Sci.* 2019. V. 20. No 18. 4567.
- Tinahones F.J., Moreno-Indias I. et al. A New Perspective on the Health Benefits of Moderate Beer Consumption: Involvement of the Gut Microbiota. // *Metabolites*. 2019. V. 9. No 11. 272.
- Gerhauser C. Beer constituents as potential cancer chemopreventive agents. // *Eur. J. Cancer*. 2005. V. 41. pp. 1941–1954.
- De Keukeleire D. *Fundamentals of beer and hop chemistry*. // *Quim. Nova*. 2000. V. 23. pp. 108–112.
- Меледина Т.В. Сырье и вспомогательные материалы в пивоварении. СПб.:Профессия, 2003. - 304 с.
- Callemien D., Collin S. Structure, Organoleptic Properties, Quantification Methods, and Stability of Phenolic Compounds in Beer—A Review. // *Food Reviews International*. 2009. V. 26. No.1. pp. 1-84. <http://dx.doi.org/10.1080/87559120903157954>.
- Asano K., Ohtsu K., Shinagawa K., Hashimoto N. Turbidity formed in beer at low temperatures. Affinity of proanthocyanidins and their oxidation products for haze-forming proteins of beer and the formation of chill haze. // *Agricultural and Biological Chemistry*. 1984. V.48. No 5. pp. 1139–1146.
- Es-Safi N. E., Le Guerneve C., Fulcrand H., Cheynier V. et al. New polyphenolic compounds with xanthylum skeletons formed through reaction between (+)-catechin and glyoxylic acid. // *J. Agric. Food Chem.* 1999. V. 47 No 12. pp. 5211–5217.
- Es-Safi N.E., Fulcrand H., Cheynier V., Moutounet M. Studies on the acetaldehyde-induced condensation of (-)-epicatechin and malvidin 3-O-glucoside in a model solution system. // *J. Agric. Food Chem.* 1999. V. 47. No 5. pp. 2096–2102.
- Es-Safi N.E., Cheynier V., Moutounet M. Study of the reactions between (+)-catechin and furfural derivatives in the

presence or absence of anthocyanins and their implication in food color change. // *J. Agric. Food Chem.* 2000. V. 48. No 12. pp. 5946–5954.

30. Es-Safi N.E., Le Guerneve C., Fulcrand H., Cheynier V. et al. Xanthylum salts formation involved in wine colour changes. // *International Journal of Food Science and Technology.* 2000. V. 35. No 1. pp. 63–74.

31. Fulcrand H., Cheynier V., Oszmianski J., Moutounet M. An oxidized tartaric acid residue as a new bridge potentially competing with acetaldehyde in flavan-3-ol condensation. // *Phytochemistry.* 1997. V. 46. No 2. pp. 223–227.

32. He J., Santos-Buelga C., Silva A.M.S., Mateus N. et al. Isolation and structural characterization of new anthocyanin-derived yellow pigments in aged red wines. // *J. Agric. Food Chem.* 2006. V. 54. No 25. pp. 9598–9603.

33. Макаренко О.А., Левицкий А.П. Физиологические функции флавоноидов в растениях // Физиология и биохимия культ. растений. 2013. Т. 45. № 2. С. 100–112.

34. Andersen O.M., Markham K.R. Flavonoids: chemistry, biochemistry and application. — New York: CRC Press, 2005. — P. 397–441.

35. Parr A.J., Bolwell G.P. Phenols in the plant and man. The potential for possible nutritional enhancement of the diet by modifying the phenols content or profile // *J. Sci. Food Agr.* 2000. V.80. pp. 985–1012.

36. Shoji T. Polyphenols as Natural Food Pigments: Changes During Food Processing. // *American Journal of Food Technology.* 2007. V. 2. pp. 570–581. <https://doi.org/10.3923/ajft.2007.570.581>

37. Zhao H., Chen W., Lu J., Zhao M. Phenolic profiles and antioxidant activities of commercial beers. // *Food Chem.* 2010. V.119. pp. 1150–1158. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.08.028.

38. Мочаба Ф., О'Коннор-Кокс Е. С. С., Акселл В. С. Effects of yeast quality on the accumulation and release of metals causing beer instability. // *J. Am. Soc. Brew. Chem.* 1996. V.54. No 3. pp. 164–171.

39. Zufall C., Tyrell T. The influence of heavy metal ions on beer flavour stability. // *J. Inst. Brew.* 2008. V. 114. No 2. pp. 134–142.

40. Pohl P., Sergiel I. Evaluation of the total content and the operationally defined species of copper in beers and wines. // *J. Agr. Food Chem.* 2009. V. 57. pp. 9378–9384.

41. Patel D.S, Shah P.B, Managoli N.B. Evaluation of in-vitro Anti-oxidant and Free Radical Scavenging activities of Withania somnifera and Aloe vera. // *Asian J. Pharm. Tech.* 2012. V. 2. No 4. pp. 143–147.

42. Dvořáková M., Hulín P., Karabín M., Dostálek P. Determination of polyphenols in beer by an effective method based on solid-phase extraction and high performance liquid chromatography with diode-array detection. // *Czech J. Food Sci.* 2007. V. 25. pp. 182–188.

43. Hucker B., Wakeling L., Vriesekoop, F. The quantitative analysis of thiamine and riboflavin and their respective vitamers in fermented alcoholic beverages // *J. Agric. Food Chem.* 2011. V. 59. pp. 12278–12285. <https://doi.org/10.1002/jfb.312>

44. Хачатурян Э.Е., Гвасалия Т.С., Якименко Т.П. Двести составляющих реакции меланоидинообразования. // Современная наука и инновации. 2014. № 4(8). С. 22–32.

45. Inoue S., Noguchi M., Hanaoka T., Minowa T. Organic compounds formed by thermochemical degradation of glucose-glycine melanoidins using hot compressed water. // *J Chem Eng Jpn.* 2004. V. 37. No 7. pp. 915–919. <https://doi.org/10.1252/jcej.37.915>.

46. Faist V., Erbersdobler H.F. Metabolic Transit and in vivo Effects of Melanoidins and Precursor Compounds Deriving from the Maillard Reaction. // *Annals of Nutrition & Metabolism.* 2001. V.45. No 1. pp. 1–12. <https://doi.org/10.1159/000046699>.

47. Gerrard J. The Maillard Reaction: Chemistry, Biochemistry and Implications by Harry Nursten. // *Australian Journal of Chemistry.* 2005. V.58. pp.756–756. https://doi.org/10.1071/CH0505_BR.

48. Gremer H.D., Menden E. Zusammenfassende Übersichtsberichte über nichtenzymatische Reaktionsreaktionen und ihre physiologischen Folgen – Z. Lebensmittel Unters. U.Forschq. 1956. – Bd. 104, h. S.33–42.

49. Davidek T., Blank I. Elucidating the Secrets of the Maillard Reaction Cascade – The Role of Amadori Compounds. // *Chimia.* 2005. V. 59. pp. 862–862. <https://doi.org/10.2533/000942905777675642>.

50. Хоконова М.Б. Азотистый состав суслу в зависимости от режима обработки несоложенного ячменя. // Пиво и напитки. 2012. № 5. С. 4–26.

51. Sengar G., Sharma H. K. Food caramels: a review. // *Journal of food science and technology.* 2014. V. 51. No 9. pp. 1686–1696. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0633-z>.

52. Zenkevich I.G., Primenov A.I., Sokolova L.I., Makarov V.G. Identification and quantitative determination of 5-(hydroxymethyl) furfural in sugar color. // *Russ J Appl Chem.* 2001. V.74. No 7. pp. 1132–1136. doi: 10.1023/A:1013027203695.

53. Vtllalon Mir M., Quesada Granados J., Lopez H., de La Serrana G., Lopez Martinez M.C. High-performance liquid chromatography determination of furanic compounds in commercial brandies and caramels. // *J Sci Food Agr.* 1999. V. 76. No 4. pp. 579–587.

54. Park Ch.-W., Kang K.-O., Kim W.-J. Effects of Reaction Conditions for Improvement of Caramelization Rate // *Korean Journal of Food Science and Technology.* 1998. V.30. No 4. pp 983–987.

55. ГОСТ 31711 «Пиво. Общие технические условия», изд-во «Стандартинформ», 2019. – 15с.

56. Dornbusch H. Bavarian Helles. Classic Beer Style Series No. 17. Brewers Publications. Boulder, Colorado. 2000. -pp. 59.

57. Jurado, J. The Renaissance of Red. // *The Brewer International.* 2002. V. 2. No 4. pp. 30–37.

58. Shellhammer T.H., Bamforth C.W. Accessing Color Quality of Beer, in: Color Quality of Fresh and Processed Food (Ed: Culver, C.A. and Wrolstad, R.E.). American Chemical Society. 2008. pp. 192–202.

59. Smedley S.M. Colour determination of beer using tristimulus values. // *J. Inst. Brew.* 1992. V. 98. pp. 497–504.

60. Lukinac J., Mastanjević K., Nakov G., Jukić M.. Computer Vision Method in Beer Quality Evaluation—A Review. // *Beverages.* 2019. V. 5. No 38. pp. 1–21; <https://doi.org/10.3390/beverages5020038>.

61. De Lange A.J. Color. In *Brewing Materials and Processes. A Practical Approach to Beer Excellence*, 1st ed.; Bamforth, C.W., Ed.; Academic Press Elsevier: London, UK, 2016; pp. 199–249.

62. ГОСТ 12789-1987 «Пиво. Методы определения цвета», Стандартинформ, 2011. – 10с.

63. Мальцев П.М., Великая Е.И., Заирная М.В., Колотуша П.В. Химико-технологический контроль производства солода и пива; М.: Пищевая промышленность, 1976. – 446с.

64. Smedley S. M. Towards Closer Colour Control in the Brewery. // *Brew. Guard.* 2005. No 9. pp. 22–25.

Статья поступила в редакцию 23.09.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 664

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0025

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
КОМПРЕССИРОВАННЫХ ТОМАТОВ ЧЕРРИ С КЛУБНИЧНЫМ ПЮРЕ**

© 2021

Макарова Надежда Викторовна, доктор химических наук, профессор кафедры,
заведующий кафедрой «Технология и организация общественного питания»

Воронина Марианна Сергеевна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технология и организация общественного питания»

Гуляева Алена Николаевна, ассистент кафедры «Технология и организация общественного питания»

Шишкова Александра Валерьевна, студент кафедры «Технология и организация общественного питания»

Самарский Государственный Технический университет

(443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус,

e-mails: fpp@samgtu.ru, marianna419@rambler.ru, nikol163@bk.ru, sashash1904@gmail.com)

Аннотация. Статья посвящена анализу физико-химических и органолептических параметров качества компрессированных томатов черри с клубничным пюре. Метод вакуумного прессования продуктов использует возможность уменьшения атмосферного давления. В ходе данного процесса происходит разрушение структуры продукта. Этот способ ведет к изменению строения, вкусовых и ароматических показателей. Для эксперимента используются бланшированные томаты черри и свежее клубничное пюре. В пакеты для вакуума к овощам добавлялось фруктовое пюре в пропорции от 5 до 45% к массе. При этом была применена тепловая обработка: варка на пару (4 минуты при 180°C) и жарка в аэрогриле (5 минут при 200°C) для томатов черри с добавлением клубничного пюре в концентрации 30% и 40%. Органолептические показатели качества компрессированных томатов черри с концентрацией клубничного пюре от 5 до 25% почти не изменились. При концентрации 30-40% появляется лёгкий клубничный привкус и аромат. С этой же концентрацией при тепловой обработке усилился вкус и запах клубники, который почти вытеснил присутствие данных показателей у томатов. Зависимость физико-химических показателей иллюстрирует, чем больше концентрация клубничного пюре, тем выше содержание сухих веществ и тем выше титруемая кислотность. В результате эксперимента выявили, что самой приемлемой по органолептическим показателям является концентрация 40% клубничного пюре к массе томатов черри с использованием термообработки на аэрогриле.

Ключевые слова: аэрогриль, вакуум, кислотность, клубника, компрессирование, пар, пюре, структура, томаты, черри.

**RESEARCH OF PHYSICO-CHEMICAL AND ORGANOLEPTIC PROPERTIES OF COMPRESSED
CHERRY TOMATOES WITH STRAWBERRY PUREE**

© 2021

Makarova Nadezhda Viktorovna, doctor of chemistry sciences, professor of the department of Technology and organization of public catering, head of the department of Technology and organization of public catering

Voronina Marianna Sergeevna, candidate of technical sciences,
associate professor of the department of Technology and organization of public catering

Gulyaeva Alena Nikolaevna, assistant of the department Technology and organization of public catering

Shishkova Alexandra Valerievna, student of the department Technology and organization of public catering

Samara State Technical University

(443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244, main building,

e-mails: fpp@samgtu.ru, marianna419@rambler.ru, nikol163@bk.ru, sashash1904@gmail.com)

Abstract. The article is devoted to the analysis of physicochemical and organoleptic parameters of the quality of compressed cherry tomatoes with strawberry puree. The vacuum pressing method of products takes advantage of the ability to reduce atmospheric pressure. During this process, the structure of the product is destroyed. This method leads to a change in the structure, taste and aroma. For the experiment, blanched cherry tomatoes and fresh strawberry puree are used. Fruit puree was added to vacuum bags for vegetables in a proportion of 5 to 45% by weight. In this case, heat treatment was applied: steaming (4 minutes at 180°C) and frying in an airfryer (5 minutes at 200°C) for cherry tomatoes with the addition of strawberry puree at a concentration of 30% and 40%. The organoleptic indicators of the quality of compressed cherry tomatoes with a strawberry puree concentration of 5 to 25% remained almost unchanged. At a concentration of 30-40%, a slight strawberry flavor and aroma appears. With the same concentration, heat treatment increased the taste and smell of strawberries, which almost replaced the presence of these indicators in tomatoes. The dependence of physicochemical indicators illustrates that the higher the concentration of strawberry puree, the higher the dry matter content and the higher the titratable acidity. As a result of the experiment, it was revealed that the most acceptable in terms of organoleptic indicators is the concentration of 40% strawberry puree to the mass of cherry tomatoes using heat treatment on an airfryer.

Keywords: airfryer, vacuum, acidity, strawberry, compression, steam, puree, structure, tomatoes, cherry.

Введение. За прошедшие годы в пищевой промышленности произошли огромные изменения, и возникла необходимость готовить безопасную пищу с минимальным использованием электроэнергии и энергии человека. Это привело к появлению современных инновационных методов приготовления пищи [1]. Многие заведения общественного питания, от закусочных до самых модных трехзвездочных ресторанов Мишлен, используют технику приготовления пищи, известную как *sous vide* [2].

Sous vide («под вакуумом») означает приготовление продуктов, которые помещают в специальные пакеты, а затем в вакуумную упаковочную машину, которая под давлением удаляет весь воздух. Далее пакет переносится во влажную среду с контролируемой температурой для приготовления [3].

Часто используются пароконвектоматы, так как они могут быть настроены на температуру варки ниже 80 °С и имеют встроенные термометры, способные отслеживать внутреннюю температуру [4]. Также часто используются циркуляторы. Эти устройства, изначально использовавшиеся в лабораториях, состоят из нагревательного элемента и насоса для точной циркуляции и нагрева воды до определенной температуры. Относительно небольшие, их можно легко прикрепить к пластиковым контейнерам и использовать везде, где есть источник питания [5].

Когда продукт запаивают в пакет, происходит несколько процессов. Воздух удаляется, создавая вакуум; продукт сжимается в пакете под давлением [6].

В то время как пакет с кофейными зернами, запечатанный под вакуумом под высоким давлением, является твердым и плотным, ломтик арбуза, обработанный аналогичным образом, будет раздавлен, сплюснен и сжат, тем самым приобретая новую интересную текстуру [7]. Понимание этой силы или давления важно при изучении того, какие продукты можно герметизировать. Необходимо соблюдать осторожность с деликатными продуктами. Например, рыбное филе можно запечатать на специально разработанных многоразовых жестких пластиковых лотках, чтобы сохранить их форму. Сиропы и маринады отлично работают под вакуумом. Эта техника отлично подходит для маринования мяса; требуется меньше ингредиентов и меньше времени, а продукт не окисляется [8].

Поскольку место для хранения на любом производстве является первоочередной задачей, продукты, запечатанные под вакуумом, имеют явное преимущество: они занимают гораздо меньше места, их часто можно складывать друг на друга, они долго хранятся в холодильнике и их можно легко идентифицировать [9].

Вакуумное прессование фруктов и овощей (компрессирование) – популярная инновационная технология, которая придает многим растительным продуктам привлекательный полупрозрачный вид и приятную, нестандартную текстуру [10].

Этот метод использует способность вакуумной камеры снижать окружающее давление, в результа-

те чего воздух и влага в растительной ткани быстро расширяются и разрывают структуры в продукте. Когда окружающее давление восстанавливается до нормального уровня, лабиринт заполненных воздухом пространств разрушается. В результате свет проходит сквозь продукт, а не рассеивается, поэтому растительные продукты, сжатые в вакууме, кажутся полупрозрачными.

Разрушение пористой структуры растительной пищи также придает несколько плотную, приятную на вкус текстуру, которая может придать знакомому ингредиенту, например, арбузу, совершенно новые органолептические показатели [11].

Целью статьи является исследование физико-химических и органолептических свойств томатов черри компрессированных с клубничным пюре.

Материалы и результаты исследования. Для эксперимента были использованы томаты-черри сорта Вишенка розовая и свежеприготовленное клубничное пюре.

Пюре из клубники было изготовлено по следующей схеме: мойка сырья → сортировка → ополаскивание → протирка ягод → гомогенизация пюре → стерилизация пюре при 100°C на протяжении 2 мин СВЧ-энергией.

Бланшированные томаты-черри были помещены в пакеты для вакуума и к ним добавлялось клубничное пюре в различных соотношениях: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 и 45% к массе томатов-черри. Образцы с концентрацией – 30 и 40%, были подвергнуты тепловой обработке: варка на пару и жарка в аэрогриле. На гриле обрабатывали 5 минут при 200°C, на пару нагревание длилось 4 минуты при 180°C.

Далее анализировали показатели содержания сухих веществ, титруемой кислотности и органолептические показатели.

Результаты органолептического анализа представлены в таблице 1.

Результаты физико-химических показателей компрессированных томатов-черри с клубничным пюре представлены в таблице 2 и на рисунке 1.

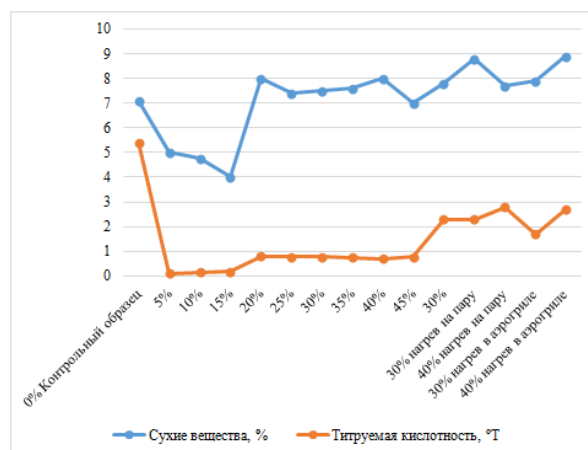


Рисунок 1 – Физико-химические показатели компрессированных томатов-черри с клубничным пюре (составлено авторами)

Таблица 1 – Органолептические показатели качества компрессированных томатов-черри с клубничным пюре [18]

П/п	Концентрация клубничного пюре к томатам-черри	Условия	Вкус	Запах	Цвет	Консистенция
1	5%	Вакуум, хранение в холодильнике в течение часа	Томатный	Томатов-черри	Красный	Мягкая, форма сохранилась
2	10%		Легкий привкус клубники, томатный	Смешанный томатов-черри с клубникой	Красный	Консистенция мягкая, форма сохранилась
3	15%		Томатный, с легким привкусом клубники	Смешанный томатов-черри с клубникой, кисловатый	Красный	Томаты потеряли свою форму
4	20%		томатный	Клубника-томат	красный	Разваристая
5	25%		томатный	Клубника-томат	красный	Держит форму
6	30%		Присутствует вкус клубники	Слабо выраженный запах клубники	Характерный (красный)	Потеряна структура помидора, мягкая
7	35%		Томатный с легким вкусом клубники	Клубничный	красный	Разваристая
8	40%		Присутствует вкус клубники	Слабо выраженный запах клубники	Характерный (красный)	Потеряна структура помидора, мягкая
9	45%		Томатно-клубничный	Клубничный	красный	Разваристая
10	30%	Вакуум, нагрев на пару	Слабо выраженный вкус клубники	Смесь запаха помидора и клубники	Характерный (красный)	Потеряна структура помидора, мягкая
11	40%		Слабо выраженный вкус клубники	Смесь запаха помидора и клубники	Характерный (красный)	Потеряна структура помидора, мягкая
12	30%	Вакуум, нагрев в аэрогриле	Ярко выраженный вкус клубники с помидором	Средне выраженный запах клубники	Характерный (красный)	Потеряна структура помидора, мягкая
13	40%		Практически отсутствует вкус помидора, ярко выраженный вкус клубники	Ярко выраженный запах клубники	Характерный (красный)	Потеряна структура помидора, мягкая
14	0% Контрольный образец	Без обработки	Характерный вкус для данного вида продукта	Характерный яркий запах	Характерный (красный)	Характерная, мягкая, держит форму

* Составлено авторами

Таблица 2 – Результаты физико-химических показателей компрессированных томатов-черри с клубничным пюре

П/п	Концентрация клубничного пюре к томатам-черри	Условия	Сухие вещества, % [19]	Титруемая кислотность, °Т [20]
1	0% Контрольный образец	Без обработки	7,1	5,4
2	5%	Вакуум, хранение в холодильнике в течение часа	5	0,1
3	10%		4,75	0,14
4	15%		4	0,16
5	20%		8	0,8
6	25%		7,4	0,78
7	30%		7,5	0,76
8	35%		7,6	0,75
9	40%		8	0,7
10	45%		7	0,78
11	30%	7,8	2,3	
12	30%	Вакуум, нагрев в аэрогриле	8,8	2,3
13	40%		7,7	2,8
14	30%	Вакуум, нагрев в аэрогриле	7,9	1,7
15	40%		8,9	2,7

* Составлено авторами

Заключение. По итогам эксперимента можно сделать вывод, что самой оптимальной по органолептическим показателям является концентрация 40% клубничного пюре к массе томатов-черри с использованием термообработки на аэрогриле. При концентрации клубничного пюре в количестве менее 30% практически не меняются органолептические показатели томатов-черри.

Зависимость физико-химических показателей прослеживается следующим образом, чем больше концентрация клубничного пюре, тем выше содержание сухих веществ и тем выше титруемая кислотность.

Вакуумное компрессирование можно использовать для приготовления различных блюд. Этим способом можно добиться самых необычных сочетаний продуктов. Например, ассамбляжи томатов-черри компрессированные с клубничным пюре входят в состав блюда Альберта Адрия шеф-повара ресторана *Tickets* (Барселона): мусс из сыров с томатами-черри в клубничном пюре и зеленым маслом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. R. Warner, M. Ha, A. Sikes, R. Vaskoska. Cooking and Novel Postmortem Treatments to Improve Meat Texture. – Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 2017. 387-423 p.
2. Нимченко В. В. Молекулярные секреты / В. В. Нимченко. – «ЛитРес: Самиздат», 2019. 300 с.
3. Куткина М.Н., Елисеева С.А. Инновации в технологии продукции индустрии питания: учебное пособие для вузов. – М.: Издательство «Троицкий мост», 2016. 168 с.
4. <https://www.chefsteps.com/>
5. Коулз Р., МакДауэлл Д., Кирван Дж. М. Упаковка пищевых продуктов. – СПб: Профессия, 2008. 402 с.
6. <https://www.sousvidemagazine.com/>
7. Спенс Ч. Гастрофизика. Новая наука о питании. – М.: Колибри, 2021. 352 с.
8. E Baldwin Douglas. Sous Vide Cooking: A Review. – International Journal of Gastronomy and Food Science, 2012. 15-30 p.
9. I. Lawrence, St.Jung. HPP as an innovation tool for healthy foods. – Present and Future of High Pressure Processing, 2020. 187-200 p.
10. Naveena B. Maheswarappa, Kiran Mohan, Deepak S. Jagadeesh. Meat Products Packaging. – Reference Module in Food Science, 2016.
11. Yu-Fan Chen, Jaspreet Singh, Jocelyn Midgley, Richard Archer. Sous vide processed potatoes: Starch retrogradation in tuber and oral-gastro-small intestinal starch digestion in vitro. – Food Hydrocolloids, 2021.
12. Cagla Caltinoglu, Bade Tonyali, Likay Sensoy. Effects of tomato pulp addition on the extrudate quality parameters and effects of extrusion on the functional parameters of the extrudates. – International Journal of Food Science & Technology, 2014.
13. Фофанова Т.С. Технология су-вид — некоторые аспекты качества и микробиологической безопасности. Теория и практика переработки мяса. 2018;3(1): 59–68. DOI: 10.21323/2414-438X-2018-3-1-59-68.
14. Полозникова Д.Н. Современная технология су-вид. – МОЛОДЕЖЬ И НАУКА, 2019. С. 71.
15. Бадмаев И. И. Современные тенденции в технологии приготовления кулинарной продукции // Пищевые технологии: сб. науч. трудов сер. «Пищевые технологии». – Улан-Удэ, 2017. С. 104-108
16. Куликова М. С., Антонова Ю. И. Перспективы термообработки кулинарной продукции комбинированными способами // Развитие научных направлений в современных условиях: сб. ст. по мат. Межд. науч.-практ. конф. - Москва, 2017. С. 47-49
17. Глазырина А. А. Использование SOUS VIDE (СУ-ВИД) технологии для приготовления блюд в общественном питании // Научные труды студентов Ижевской ГСХА. - Ижевск, 2017. С. 715-718.
18. ГОСТ 31986-2012 Услуги общественного питания. Метод органолептической оценки качества продукции общественного питания
19. ГОСТ ISO 2173-2013 Продукты переработки фруктов

и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ
20. ГОСТ ISO 750-2013 Продукты переработки фруктов и овощей. Определение титруемой кислотности.

Статья поступила в редакцию 11.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 663.443.1; 663.443.49

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0026

**ПОЛУЧЕНИЕ ЭКСТРАКТА ИЗ КОРНЕЙ *CODONOPSIS JAVANICA* (BLUME) HOOK.F. & THOMSON,
ПРОИЗРАСТАЮЩЕГО В РАЙОНЕ ТАУЖАНГА, ВЬЕТНАМ**

© 2021

Табакеева Оксана Вацлавовна, доктор технических наук, доцент,
профессор Департамента пищевых наук и технологий Института наук о жизни и биомедицины

Буй Зань Чунг, аспирант Института наук о жизни и биомедицины,

Чан Дык Куан, аспирант Школы естественных наук

Дальневосточный федеральный университет

(690920, Россия, Приморский край, г. Владивосток, п. Аякс, 10,

e-mails: yankovskaya68@mail.ru, danhchungbui@gmail.com)

Аннотация. Возможности использования растительного сырья в пищевой промышленности и фитотерапии далеко не исчерпаны. Экстрагирование биологически активных веществ (БАВ), с получением экстрактов, различных свойств и различной биологической активности, которые могут использоваться в различных направлениях является одним из важнейших процессов в технологиях переработки растений, в том числе и лекарственно-технических. Экстракция БАВ из растительного сырья имеет свои специфические особенности, в частности, связанные с операциями технологической подготовки, в которые входят процессы обезвоживания, измельчения, хранения сырья и т.д. Для эффективного процесса необходимо экспериментально определить и регулировать оптимальные технологические параметры экстрагирования. С целью разработки технологии экстракта из корней *C.javanica* (blume) Hook.f. & Thomson, произрастающего в районе Таужанга, Вьетнам, экспериментально и с применением математического моделирования путем определения оптимальных условий экстрагирования установлены параметры получения экстракта из сухого сырья – время 3,5 часа, температура 45°C, концентрация растворителя (этилового спирта) 45-49%, гидромодуль 1:7. Полученный экстракт имеет темно-коричневый цвет с желтоватым оттенком и достаточно приятный запах, вкус сладкий с горьковатым послевкусием. По результатам органолептической оценки установлено, что экстракт сохраняет присущие ему вкусо-ароматические свойства в процессе хранения в герметичной светонепроницаемой упаковке при температуре 20±10°C в течение 6 месяцев.

Ключевые слова: экстракт, *C.javanica*, математическое моделирование, параметры.

**OBTAINING AN EXTRACT FROM THE ROOTS OF *CODONOPSIS JAVANICA* (BLUME) HOOK.F. &
THOMSON, GROWING IN THE AREA OF TAUJANG, VIETNAM**

© 2021

Tabakaeva Oksana Vatslavovna, doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the Department of food sciences and technologies of the Institute of life sciences and biomedicine

Bui Zan Chung, postgraduate student of the Institute of life sciences and biomedicine

Chan Duc Kuan, postgraduate student of the School of natural sciences

Far Eastern Federal University

(690920, Russia, Primorsky Krai, Vladivostok, Ajax, 10,

e-mails: yankovskaya68@mail.ru, danhchungbui@gmail.com)

Abstract. When using plant raw materials in the food industry and phytotherapy, the central process is the extraction of biologically active substances (BAS) contained in it to obtain extracts. Despite the apparent simplicity of the process, the extraction of BAS has its own specific features, in particular, related to the operations of technological preparation, which include the processes of dehydration, grinding, storage of raw materials, etc. For this it is necessary to select and adjust the optimal technological parameters of extraction. In order to develop the technology of extract from the roots of *C.javanica* (blume) Hook.f. & Thomson, growing in the area of Taujang, Vietnam experimentally and using mathematical modeling by determining the optimal extraction conditions, the parameters for obtaining an extract from the dry roots of *C.javanica* were established – time 3.5 hours, temperature 45°C, ethyl alcohol concentration 45-49%, hydromodule 1:7.

Keywords: extract, *C.javanica*, mathematical modeling, parameters.

Введение. Использование лекарственно-технических растений в пище и в медицине, в том числе и восточной традиционной известно с древних времен. При использовании растительного сырья в пищевой промышленности и фитотерапии одним из центральных и важнейших процессов является экстрагирование биологически активных веществ (БАВ), содержащихся в нем, с получением экстрактов. Процесс

экстрагирования БАВ является многоступенчатым, состоящим из нескольких основных стадий [1-4].

Несмотря на кажущуюся простоту процесса, экстракция БАВ имеет свои специфические особенности, в частности, зависящие от операций технологической подготовки, в которые входят процессы обезвоживания, измельчения, хранения сырья и т.д. [5, 6].

Хотя подготовка является одним из важных и не-

обходимых процессов, но основным условием для полноты экстрагирования и получения качественного конечного продукта является стабильность экстракции и максимальная концентрация БАВ в конечном продукте. Для этого необходимо подобрать и регулировать оптимальные технологические параметры экстрагирования [7-9]. Все вышесказанное относится и к процессу получения экстракта БАВ из растения *Codonopsis javanica* (Blume) Hook.f. & Thomson.

В качестве сырья для получения экстрактов из *C. javanica* можно использовать свежие или высушенные корни, однако *C. javanica* – это сезонное растение (свежие корни можно добывать только с июня по сентябрь), поэтому использование свежего сырья круглогодично не предоставляется возможным, а выращивание в тепличных условиях не налажено. Помимо этого, корни *C. javanica* в свежем виде содержит много жидкости (сока), что создает определенные сложности для долгого хранения в обычных условиях и требует дополнительных затрат. Для оптимизации соотношения расхода экстрагента и максимального количества БАВ в экстракте, целесообразнее экстракт получать из корней, высушенных методом воздушно-теневого сушки. В корнях *C. javanica* содержится ряд БАВ: полисахарид инулин, алкалоиды сиригин, *N*-гексил *D*-глюкопиранозид, этил-*D*-фруктофуранозид, таншенозид *I* и холин [10-12]. Однако, экстрагирование этих веществ из *C. javanica* имеет ряд сложностей, в частности связанных с тем, что многие важные биологически активные соединения находятся в деревянной сердцевине, которая со временем твердеет и склерозизируется, что существенно усложняет процесс экстракции. Также процесс удаления воды обычно приводит к изменению свойств и химического состава [13,14]. Все это касается и корней *C. javanica*, как сырья, подвергающегося сушке. Высокое содержание воды в нативном способствовует увеличению скорости процессов гидролитического и ферментативного распада БАВ, что способно уменьшать биологическую активность нативного сырья [15]. Основываясь на этих закономерностях в настоящее время при производстве растительных экстрактов обычно используется сушка при пониженной температуре с помощью циркуляции воздуха, где температура процесса не выше 40°C, чтобы минимизировать изменения и снижение характеристики высушенного продукта.

При получении экстрактов также важны скорость и энергоёмкость процесса. Необходимо отметить, что изменение физических свойств корней *C. javanica*, связанное с уменьшением содержания воды при сушке, приводит к значительному влиянию на все стадии процесса экстракции и является важной отличительной особенностью процесса извлечения БАВ [16]. Одним из способов увеличения скорости экстрагирования является увеличение поверхности раздела фаз, что может достигаться измельчением сырья, так как при этом увеличивается поверхность. Однако, при измельчении сырья следует иметь в виду, что слишком мелкие частицы могут наоборот уменьшить общую

скорость процесса [17]. В корнях *C. javanica* содержится большое количество полисахаридов, которые при контакте с жидкостью набухают и внешние слои частиц образуют липкие оболочки, что препятствует проникновению экстрагента. Именно это приводит к неравномерности процесса и уменьшения массообмена от частиц к жидкости в отдельных зонах слоя частиц. На полноту и скорость извлечения БАВ из высушенных корней *C. javanica* наряду с размером частиц сырья, и качеством сырья также существенно должно влиять количество экстрагента. Исходя из вышесказанного можно утверждать, что определяющими факторами, влияющими на эффективность экстракции биологически активных веществ из корней *C. javanica* являются: используемый экстрагент, температура, размеры частиц, соотношение сырья и экстрагента, а также продолжительность процесса. Таким образом, для разработки технологии получения экстрактов биологически активных веществ из корней *C. javanica* с учетом многофакторности процесса целесообразно использование научных математических методов, в частности, метода планирования многофакторного эксперимента [18].

Цель работы: разработка технологии экстракта из корней *C. javanica* (blume) Hook.f. & Thomson, произрастающего в районе Таужанга, Вьетнам.

Материалы и результаты исследования. В представленной работе объектом исследования являлись высушенные циркулированным воздухом корни *C. javanica*, собранные в районе Таужанг, Вьетнам, возраст корня 4 года. Корни *C. javanica* промыли проточной водой и высушили в воздушной сушильной установке модели *DS-86S/ DS-86M* корейского производителя *Dasol* при температуре сушки 45±5°C. Влажность сырья после сушки составляла 10.3%. В данном эксперименте использованы пластины толщиной 3мм, поскольку сухие корни *C. javanica* очень сильно набухают, что препятствуют процессу экстрагирования. Основываясь на данных об экстракционной способности экстрагентов были выбраны вода и водно-этанольная смесь, как растворители для извлечения фенольных соединений, различных органических кислот и их солей, витаминов.

Количественное содержание фенольных соединений определяли с использованием реактива Фолина-Чокальтеу. Метод основан на восстановлении смеси фосфорновольфрамовой и фосфорномолибденовой кислот в щелочной среде и является основным методом для определения общего содержания фенолов в лекарственном растительном сырье и пищевых продуктах [19]. Оптическую плотность растворов измеряли через 20 минут при 720 нм с помощью спектрофотометра «*UV-1800*» («*Shimadzu*», Киото, Япония). Пересчет в единицы концентрации проводили по градуировочному графику, полученному для стандартного полифенола рутина.

Полноту экстрагирования определяли выходом фенольных соединений (*y*), выраженным в процентах по отношению к начальному содержанию их в сырье;

в качестве варьируемых факторов: температура ($t(x_1)$), концентрация этилового спирта (x_2), продолжительность экстрагирования (x_3), кодированные переменные X_1 , X_2 , X_3 соответственно. Основные уровни и шаги варьирования факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения уровней факторов и шагов варьирования

Условия планирования	Натуральные значения фактора		
	x_1 , °C	x_2 , % спирта	x_3 , ч
Основной уровень (0)	45	62.5	2.5
Интервал варьирования	10	5	1
Верхний уровень (+1)	50	60	3
Нижний уровень (-1)	40	65	2

На первом этапе провели выбор оптимального соотношения сырья и экстрагента (q), при этом другие условия оставили постоянными, а q было 1:3, 1:5, 1:7. Значения снимали каждый час, в результате получили данные, представленные на рисунке 1, при этом другие факторы остались постоянными ($T=45^\circ\text{C}$, $\tau=6$ час., 60% этилового спирта).

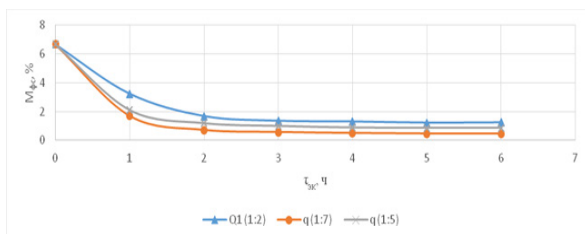


Рисунок 1 – Концентрационные кривые экстрагирования фенольных веществ из корней *C. Javanica* (составлено авторами)

Из графических зависимостей на рисунке 1 видно, что вместе с повышением соотношения экстрагента к сырью эффективность процесса увеличивается. При соотношении 1:2 после набухания количество экстрагента осталось слишком мало, что уменьшает массопередачу и не позволяет достичь максимальной эффективности. С увеличением количества экстрагента эффективность улучшается.

Уравнения графика можно записать следующим образом:

$$Y(1:2) = -0.0844x^3 + 1.0607x^2 - 4.2339x + 6.6095R^2 = 0.9962$$

$$Y(1:5) = -0.0844x^3 + 1.0607x^2 - 4.2339x + 6.6095R^2 = 0.9962$$

$$Y(1:7) = -0.1331x^3 + 1.5515x^2 - 5.5483x + 6.4271R^2 = 0.9731$$

Конечное количество фенольных веществ представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Количество фенольных веществ в полученном экстракте

Соотношение (q)	Конечное количество фенольных веществ в экстракте (мг/кг)
1:3	47±3
1:5	53±2
1:7	45±3

Очевидно, хотя избыток растворителя увеличивает эффективность процесса, но при этом продукт слишком сильно разбавлен, он требует дополнительных операций по концентрированию, что не выгодно для промышленного производства. Таким образом, для дальнейших опытов принято постоянным значение

$q = 1:7$.

Выбор каждого параметра отдельно требует очень много времени и сил, вместе с этим возрастают и затраты на эксперименты, поэтому с целью сокращения продолжительности исследований использовали матрицу планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа 2^3 . При этом количество опытов рассчитали по формуле [20]:

$$N = 2^n + 2n + 1$$

При n – количество зависимых факторов, 2^n – количество опытов в звездных точках (табл. 2, опыты 9-14).

При этом измерения проводили двукратно, воспроизводимость опытов проверяли 6-тью параллельными опытами в середине точки плана (табл. 3, опыты 15-20).

Таблица 3 – Матрица планирования и результаты эксперимента

Опыт	X_1	X_2	X_3	x_1 , °C	x_2 , %	x_3 , ч	y , мг/кг
1	-1	-1	-1	40	60	2	38.1
2	1	-1	-1	50	60	2	40.9
3	-1	1	-1	40	65	2	39.0
4	1	1	-1	50	65	2	45.1
5	-1	-1	1	40	60	3	50.6
6	1	-1	1	50	60	3	54.9
7	-1	1	1	40	65	3	52.3
8	1	1	1	50	65	3	55.3
9	-1.68	0	0	35	62.5	2.5	40.2
10	1.68	0	0	55	62.5	2.5	46.3
11	0	-1.68	0	45	57.5	2.5	39.9
12	0	1.68	0	45	67.5	2.5	38.3
13	0	0	-1.68	45	62.5	1.5	35.3
14	0	0	1.68	45	62.5	3.5	53.7
15	0	0	0	45	62.5	2.5	43.2
16	0	0	0	45	62.5	2.5	42.9
17	0	0	0	45	62.5	2.5	43.5
18	0	0	0	45	62.5	2.5	43.8
19	0	0	0	45	62.5	2.5	43.1
20	0	0	0	45	62.5	2.5	44.0

Использование метода планирования полного факторного эксперимента типа 2^3 позволяет рассчитать регрессионные коэффициенты и одновременно построить на основе полученных данных уравнение первого порядка. Полную статистическую обработку экспериментальных данных, заключающуюся в вычислении коэффициентов, проверке их значимости, оценке воспроизводимости опытов и установлении адекватности полученного регрессионного уравнения произвели с помощью компьютерной программы *Excel*. Таким образом, были рассчитаны значения свободного члена b_0 , среднее арифметическое значение функции отклика \bar{y}_0 в центре эксперимента, оценка дисперсии разности $S^2(\bar{y}_0 - b_0)$ и доверительная ошибка разности ε (табл. 4).

Таблица 4 – Статистическая обработка результатов

Показатель	Значение
Свободный член, b_0	23.240
Среднее арифметическое значение функции отклика в центре эксперимента, \bar{y}_0	42.28
Оценка дисперсии разности, $S^2(\bar{y}_0 - b_0)$	5.92
Разность $ \bar{y}_0 - b_0 $	19.04
Доверительная ошибка разности ϵ	1.32

Далее получили уравнение:

$$y = 23,24 + 1,89X_1 + 0,32X_2 - 0,183X_{11} - 1,03X_{22} + 0,07X_{33} + 0,24X_1X_2 - 0,357X_2X_3 - 0,19X_1X_3$$

Далее определили оптимальные параметры экстрагирования x_1 , x_2 и x_3 , при которых выход фенольных веществ максимальный $y_1 = f(x_1, x_2, x_3)$. С помощью метода неопределенных множителей Лагранжа записали задачу оптимизации аналитически следующим образом:

$$\begin{cases} y = 23,24 + 1,89X_1 + 0,32X_2 - 0,183X_{11} - 1,03X_{22} + 0,07X_{33} + 0,24X_1X_2 - 0,357X_2X_3 - 0,19X_1X_3 \rightarrow \max \\ x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = R^2 \end{cases}$$

В ротатбельном планировании ограничением в факторном пространстве является радиус сферы R , центр которой совпадает с центром эксперимента. Составили целевую функцию F , которая включает сумму уравнения $f(x_1, x_2, x_3)$, подлежащего оптимизации и ограничения $\varphi(x_1, x_2, x_3)$, умноженного на неопределенный множитель Лагранжа λ

$$F = 23,24 + 1,89X_1 + 0,32X_2 - 0,183X_{11} - 1,03X_{22} + 0,07X_{33} + 0,24X_1X_2 - 0,357X_2X_3 - 0,19X_1X_3 + \lambda(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 - R^2)$$

Решая с помощью матрицы Гессе найдены частные производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(x)}{\partial X_1} &= -0,366X_1 + 0,05X_2 + 1,89 + 2\lambda X_1 = 0 \\ \frac{\partial F(x)}{\partial X_2} &= 0,05X_1 - 2,06X_2 - 0,357X_3 + 0,32 + 2\lambda X_2 = 0 \\ \frac{\partial F(x)}{\partial X_3} &= -0,357X_2 + 0,14X_3 + 2\lambda X_3 = 0 \\ \frac{\partial F(x)}{\partial \lambda} &= X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 - R^2 = 0 \end{aligned}$$

Для решения выше представленной системы уравнений с последующим вычислением значений функции отклика при изменении радиуса сферы R в диапазоне от 1,682 до 0 воспользовались интегрированным пакетом MAPLE 12 (табл. 5).

Таблица 5 – Матрица Гессе

Номер шага	R	X_1	X_2	X_3	λ	y, %
1	0	0	0	0		23,24
2	0.20	0.20	-0.04	0.00	-4.84	23.24
3	0.40	0.40	0.05	0.00	-2.37	23.39
4	0.60	0.60	0.07	0.01	-1.57	23.75
5	0.80	0.60	0.07	-0.01	-0.01	24.27
6	1.00	0.80	0.08	-0.01	-1.17	25.34
7	1.20	1.00	0.10	-0.02	-0.93	26.00
8	1.40	1.19	0.11	-0.03	-0.78	26.80
9	1.68	1.39	0.12	-0.04	-0.66	27.81

Таким образом, полученные значения демонстрируют, что при увеличении радиуса сферы R выход

экстрагированных фенольных веществ увеличивается. Однако, дальнейшее движение не имеет значение, так как имеется ограничение $-1,68 \leq X_j \leq 1,68$. Таким образом, оптимальными следует признать результаты, полученные на 9-ом шаге оптимизации, обеспечивающие достижение максимального выхода экстрактивных веществ. Натуральные значения факторов, являющиеся оптимальными условиями экстрагирования корней *C. javanica* представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Условия экстрагирования корней *C. javanica*

Условия экстрагирования	Натуральные значения фактора				
	x_1 , °C	x_2 , % спирта	x_3 , ч	пропорция сырье:экстрагент	размер слайсов, мм
Уровень (0)	45	58.94	3.46	1:7	2

Основываясь на полученных результатах и статистической обработке данных технология получения экстракта из корней *C. javanica* будет выглядеть следующим образом (рис. 2).

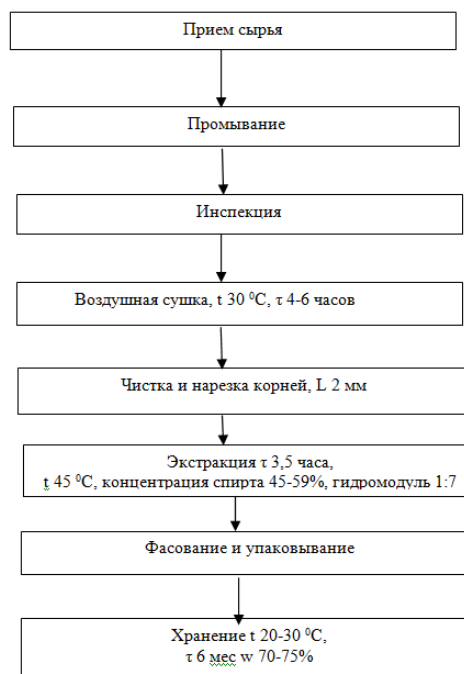


Рисунок 2 – Технологическая схема получения экстракта из корней *C. javanica* (составлено авторами)

Сырье после сортирования на поле сразу промывают и вторично сортируют, при этом выбираются четырехлетние, целые корни. Соответствующие по качеству корни проходят нарезку (толщина слайсов 3 мм). Слайсы помещают в емкость для экстрагирования, добавляют экстрагент в соотношении 1:7. Проводят нагревание до $45 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 3,5 часов. После окончания процесса полученный экстракт подвергается фильтрации, инспектируется на соответствие показателям качества, взвешивается, фасуется и упаковывается. Срок хранения составляет 6 месяцев.

Полученный экстракт имеет темно-коричневый цвет с желтоватым оттенком и достаточно приятный запах, вкус сладкий с горьковатым послевкусием. По результатам органолептической оценки установлено, что экстракт сохраняет присущие ему вкусоарома-

тические свойства в процессе хранения в герметичной светонепроницаемой упаковке при температуре $20 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 6 мес.

Заключение. Экспериментально и с применением математического моделирования путем определения оптимальных условий экстрагирования разработана технология экстракта из корней *C.javanica (blume) Hook.f. & Thomson*, произрастающего в районе Тау-жанга, Вьетнам. Установленные параметры получения экстракта – время 3,5 часа, температура 45°C , концентрация этилового спирта 45–49%, гидромодуль 1:7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ищенко В.И. Промышленная технология лекарств. УО «Витебский государственный медицинский университет», 2012. 568 с.
2. Леонова М.В., Климочкин Ю.Н. Экстракционные методы изготовления лекарственных средств из растительного сырья. Самарский государственный технический университет, 2012. 112 с.
3. Пономарев В.Д. Экстрагирование лекарственного сырья. М.: Медицина, 1976. 204 с.
4. Аксельруд В.А., Лысянский В.М. Экстрагирование С-Пб.: Химия, 1974. 256 с.
5. Мальшев Р.М., Кутепов А.М., Золотников А.Н. Процессы пульсационной экстракции из растительного сырья // Теоретические основы химических технологий. 2001. №1. С.57-60.
6. Краснюк И.И., Михайлова Г. В., Чижова Е.Т. Фармацевтическая технология: технология лекарственных форм. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 464 с. .
7. Жматова Г.В. Методы интенсификации технологических процессов экстрагирования биологически активных веществ из растительного сырья // Вестник ПТТУ. 2005. Т.11. № 3. С. 701 – 707.
8. Вайнштейн В.А., Каухова И.Е. Двухфазная экстракция в получении лекарственных и косметических средств. СПб, 2010. 104 с.
9. Халитова Э.Ш. Исследование процесса извлечения экстрактивных веществ из растительного // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской науч.-метод. конф. Оренбург. 2015. С. 1021 – 1025.
10. Н. М. Т. Pham Xuan Sinh, First step of study on saponin composition of the danseng of vietnam // Pharmacy. 2002. V. 34. pp. 6-9.
11. Tran Thanh Ha, Do Thi Ha Chemical composition of n-butanol extract of Vietnamese danseng roots *Codonopsis javanica (Blume) Hook. f.* // Pharmacy. 2016. V. 480. pp. 35-39.
12. Nguyen Thi Thang Long Dinh Thi An, Trinh Thi Diep Chemical constituents of n-hexane extract from *codonopsis javanica (blume) hook.F.* Roots collected in Lamdong province of Vietnam // Journal medical and treatment Hue. 2020, V. 10(1). pp. 25-29.
13. Штрыкова В.В. Получение биологически активных веществ из растительного сырья: лабораторный практикум. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 36 с.
14. Минина С.А., И.Е. Каухова Химия и технология фитопрепаратов. М.: Издательский дом «ГЭОТАР-МЕД», 2004. 560 с.
15. Солдатенков А.Т., Колядина М.Н., Шендрик И.В. Основы органической химии лекарственных веществ. М.: Мир, 2003. 192 с.
16. Пшуков, Ю.Г., Гужева Н.Н., Стоянова Е.В. Совершенствование технологии жидких экстрактов как фактор сохранения природных ресурсов // Фармация в XXI веке: инновации и традиции: Тезисы докладов международной научной конференции. 1999. С.69.
17. П. В. Попов Диффузия: учебно-методическое пособие по курсу Общая физика. М.: МФТИ, 2016. 58 с.
18. Реброва И. А. Планирование эксперимента. Омск. СибАДИ, 2010. 107 с.
19. FFS 1.5.3.0008.15 the Determination of tannins in herbal drugs and medicinal plant preparations. Available at: http://193.232.7.120/feml/clinical_ref/pharmacopoeia_2/HTML/#417/z Russian
20. Хамханов К.М. Основы планирования эксперимента. Улан-Удэ, 2001. 89с.

Статья поступила в редакцию 29.10.2021
Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 636.087.7

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0027

СКРИНИНГ ДРОЖЖЕВЫХ КУЛЬТУР КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПРОДУЦЕНТОВ ПОЛНОЦЕННОГО БЕЛКА НА ОТХОДАХ МАСЛИЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2021

Фоменко Иван Андреевич, аспирант
Мижева Айслу Альбертовна, магистрант

Московский государственный университет пищевых производств

(125080, Россия, Москва Волоколамское шоссе д.11, e-mail: iv.fomenko@mail.ru, mizheva.aishu@mail.ru)

Аннотация. В статье представлен результат скрининга дрожжевых культур на отходах масличного производства. При выборе перспективных продуцентов среди чистых культур дрожжей стоит обратить внимание на такие параметры, как: накопление биомассы, накопление «сырого» протеина и конверсия. В работе использовались микроорганизмы из Национального биоресурсного центра Всероссийской Коллекции Промышленных Микроорганизмов (ВКПМ) НИЦ «Курчатовский институт» – ГосНИИгенетика, *Russian Collection of Agricultural Microorganisms (RCAM)*, Коллекции кафедры «Биотехнологии и технологии продуктов биорганического синтеза» ФГБОУ ВО МГУПП. Были проведены скрининги на плотных и жидких питательных средах. В результате проведения скрининга потенциальных продуцентов белка для дальнейшей работы по разработке технологии получения высококачественной биомассы были выбраны следующие штаммы: *Kluyveromyces marxianus Y-4557*, *Debaryomyces hansenii Y-3863*, *Candida blancii RCAM3343*, *Candida parapsilopsis D-18*. Первые два штамма могут использоваться для получения белковых концентратов и изолятов, которые возможно использовать для получения биологически активной добавки к пище человека.

Ключевые слова: дрожжи, скрининг, гидролизат, лузга подсолнечника, «сырой» протеин.

SCREENING OF YEAST CROPS AS POTENTIAL PRODUCERS OF COMPLETE PROTEIN ON OIL PRODUCTION WASTE

© 2021

Fomenko Ivan Andreevich, graduate student
Mizheva Aishu Albertovna, undergraduate student

Moscow State University of Food Production

(125080, Russia, Moscow Volokolamskoe highway 11, e-mail: mizheva.aishu@mail.ru)

Abstract. The article presents the result of the screening of yeast cultures on oilseed waste. When choosing promising producers among pure yeast cultures, it is worth paying attention to such parameters as: biomass accumulation, "crude" protein accumulation and conversion. The work used microorganisms from the National Bioresource Center of the All-Russian Collection of Industrial Microorganisms (VKPM) NRC "Kurchatov Institute" - GosNIIgenetics, *Russian Collection of Agricultural Microorganisms (RCAM)*, Collections of the Department of "Biotechnology and technology of products of bioorganic synthesis" FSBEI VO MGUPP. Screenings were performed on solid and liquid culture media. As a result of screening potential protein producers, the following strains were selected for further work on the development of a technology for obtaining high-quality biomass: *Kluyveromyces marxianus Y-4557*, *Debaryomyces hansenii Y-3863*, *Candida blancii RCAM3343*, *Candida parapsilopsis D-18*. The first two strains can be used to obtain protein concentrates and isolates, which can be used to obtain a biologically active supplement to human food.

Keywords: yeast, screening, hydrolyzate, sunflower husk, "crude" protein.

Введение. Объемы производимого масла с каждым годом увеличиваются. Мировой прирост производства масличных за 15 лет составляет более 200% [4]. Согласно статистике потребления масла, на душу населения в США приходится 9,6 кг в год, в Европе 37,8 кг, а в России 13,5 кг. Увеличение производства масла сопряжено с образованием большого количества отходов. Основными масличными культурами являются рапс, сафлор, лен и подсолнечник [6]. На территории Российской Федерации основной масличной культурой является подсолнечник.

По данным института конъюнктуры аграрного рынка урожайность подсолнечника в России в 2020 году составила 13,8 – 13,9 млн т, что составляет 70% от сбора всех масличных культур. Лужность семян подсолнечника достигает 25 – 30 % от массы неочищенной семечки. Так же по данным ИКАР в 2020 году экспорт подсолнечника составил 1,6 млн т, то есть око-

ло 12 млн т подсолнечника было переработано.

В настоящее время лузгу подсолнечника используют в качестве топлива в виде прессованных брикетов. Брикетированию подвергается 40% образующейся лузги, остальные 60% захораниваются или утилизируются с помощью сжигания [14]. Существуют и нетрадиционные варианты использования лузги подсолнечника. В одной из работ был предложен способ получения фитомеланинов из данного отхода, однако данная технология не нашла широкого применения [8; 22]. Одним из путей решения проблемы утилизации лузги подсолнечника может быть биоконверсия этого трудноперерабатываемого отхода в кормовые препараты с высоким содержанием белка.

Дрожжи достаточно давно используются при производстве хлеба, вин, пивных напитков и в сельском хозяйстве. Они относятся к надцарству эукариоты. Подразделяются на аскомицеты и базидиомицеты.

Согласно современной классификации дрожжей, в настоящее время их насчитывается примерно 1500 видов [18].

Дрожжевые продукты и корма, содержащие дрожжевые компоненты, разрешенные к использованию в рационах сельскохозяйственных животных, представлены в списках *AAFCO* [15]. В сельском хозяйстве применяют в основном дрожжи рода *Saccharomyces*, *Kluyveromyces* и *Candida* [9; 23].

Дрожжи рода *Candida* чаще всего встречались на гидролизных заводах по производству БВК, однако в последнее время все больше ученых склоняются к тому, что большинство представителей этого рода токсичны и не могут использоваться в качестве продуцентов белка [12]. Напротив, представитель *Saccharomyces* и *Kluyveromyces* включены в список *GRAS (FDA)*, что свидетельствует о возможности использования их в качестве кормовой и пищевой добавок [20;21].

Для нормального роста и развития дрожжи используют углеводы. Лузга подсолнечника является источником клетчатки. Клетчатка состоит из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Количество целлюлозы составляет 30 – 50%, гемицеллюлозы 25 – 35% и лигнина до 30% [13; 7].

Одной из главных задач животноводства является повышение эффективности кормов. В связи с тем, что постепенно вводится запрет на использования антибиотиков в кормах, все больше внимания привлекают дрожжевые добавки, способствующие естественному росту [19]. Дрожжи содержат около 50% сырого протеина [14]; являются источником витаминов группы В, а также минеральных соединений.

Добавление кормовых дрожжей позволит обогатить рацион питания животных полноценным белком, а также защитить их от токсинов за счет адсорбции полисахаридами клеточной стенки [1]. В рационах сельскохозяйственных животных должно быть до 90–130 г перевариваемого протеина на 1 кормовую единицу. В грубых кормах его содержится не более 50–75 г, и поэтому углеводсодержащие корма используются нерационально. Кормовые дрожжи содержат все незаменимые аминокислоты. Соотношение фосфора и кальция в дрожжах способствует нормальному развитию костного скелета молодняка. На развитие животных сильно влияют микроэлементы и витамины, находящиеся в дрожжах; биотин предупреждает кожные заболевания. По количеству витаминов группы В дрожжи превосходят все кормовые продукты. Дрожжи содержат также токоферол, эргостерин и холин, являющийся регулятором метаболизма жиров [17; 16].

Имеются научные сведения, опираясь на которые дрожжи можно рассматривать не только в качестве продуцента кормового белка для сельскохозяйственных животных, но и в качестве полноценной белковой добавки в рационе человека [10]. Дрожжи очень полезны в пищевой промышленности и часто используются в традиционных заквасках, которые считаются безопасными [2]. Они могут проявлять устойчивость к антибактериальным препаратам, что является

предпосылкой для их дальнейшего использования не только в качестве источника пищевого белка, но и пробиотиков, и способны передавать гены лекарственной устойчивости другим микроорганизмам [11].

В отличие от растительного белка, микробный белок содержит в своем составе незаменимые аминокислоты практически в полном составе, что доказано многочисленными анализами аминокислотного состава дрожжевого белка. Белок микробного происхождения сопоставим с «эталонным» белком, принятому ФАО/ВОЗ. Нельзя не отметить значительного преимущества, заключающегося в сверхпродуктивности микроорганизмов, в разы превосходящей прирост массы растительных или животных источников белка. По результатам многочисленных исследований отмечается, что микробный белок безвреден и может быть использован в качестве альтернативного источника полноценного белка в рационе человека [3].

Использование подсолнечной лузги в качестве субстрата для получения белкового продукта на основе дрожжей, позволит сократить количество образующихся отходов.

Целью работы является выбор перспективных штаммов дрожжей для использования их в биоконверсии подсолнечной лузги в высокобелковый продукт кормового или пищевого назначения.

Актуальность работы обусловлена дефицитом дешевого и качественного кормового и пищевого белка на рынке [24]. Неукоснительный рост животноводства и белковая недостаточность в питании человека, делают дрожжевые продукты востребованными на рынке кормовых и пищевых добавок. Однозначным преимуществом использования дрожжей является возможность культивирования их на отходах масличного производства – подсолнечной лузге.

Методы и материалы исследования. Исходным субстратом, подвергающимся переработки, являлась лузга подсолнечника, полученная на масличном предприятии ООО «БУНГЕ СНГ». С целью переработки данного субстрата была проведена измельчение субстрата, щелочная делигнификация и ферментативный гидролиз с целью получения сбраживаемых сахаров.

При разработке технологии биоконверсии подсолнечной лузги в белковый препарат были использованы коллекционные штаммы дрожжей. В работе использовались микроорганизмы из Национального биоресурсного центра Всероссийской Коллекции Промышленных Микроорганизмов (ВКПМ) НИЦ «Курчатовский институт» – ГосНИИгенетика, *Russian Collection of Agricultural Microorganisms (RCAM)*, Коллекции кафедры «Биотехнологии и технологии продуктов биоорганического синтеза» ФГБОУ ВО МГУПП. К основным критериям для отбора стоит отнести такие показатели, как: накопление биомассы, накопление «сырого» протеина и конверсия. В качестве «контроля» по отношению к нетипичным культурам родов *Debaryomyces* и *Kluyveromyces* были использованы нетоксичные штаммы дрожжей рода *Candida*, полученные из коллекции *Russian Collection*

of *Agricultural Microorganisms (RCAM)*.

При получении ферментолита подсолнечной лузги, нативный субстрат измельчают до размера частиц 30 – 100 мкм (ротаторная ударная мельница *Retsch SR 200*, анализ размера частиц на анализаторе частиц *HELOS (H3908) & RODOS/L, R5*), измельченные частицы подвергают делигнификации (супендируют в 4% растворе едкого натра при гидромодуле 1:8,5 и выдерживают при температуре (125±1)°C, суспензию центрифугируют и сливают экстрагент). Полученный влажный осадок делигнифицированной лузги суспендируют в воде и подвергают ферментативному гидролизу при температуре (50±1)°C, pH (5,0±0,1) в течение 24 ч. Гидролиз осуществляется в присутствии ферментного препарата *RovabioMax AP (Adisseo France S.A.S.)*, целлюлолитическая активность 1900 Ед/г (по ГОСТ Р 55293-2012), ксиланазная активность 23500 Ед/г (по ГОСТ Р 55302-2012). После 24 ч суспензию центрифугируют, полученный ферментолит используют для получения белковых препаратов.

Ферментолит подсолнечной лузги имеет следующие характеристики: содержание сухих веществ – 7,5 – 8,0%, содержание редуцирующих веществ (по Бертрану) – 3,0 – 3,5% из них глюкоза – 69,65%, целлюлоза – 16,08%, высшие сахара – 14,27% (ВЭЖХ)

Отбор штаммов микроорганизмов проводили в два этапа: 1) скрининг на агаризованных питательных средах; 2) скрининг при глубинном культивировании в колбах.

Для проведения скрининга на агаризованных питательных средах исследуемый штамм микроорганизма высевали «штрихом» на поверхность агаризованной питательной среды, учет результатов проводили визуально, рост оценивали исходя из максимума в «+++». Состав питательных сред (ПС) представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав агаризованных питательных сред для скрининга дрожжевых культур

Компонент питательной среды	Содержание компонента, %			
	Контроль	ПС-1	ПС-2	ПС-3
Глюкоза	2,0	–	–	1,5
Целлюлоза	–	–	2,0	0,5
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,5	0,5	0,5	0,5
MgSO ₄	0,1	0,1	0,1	0,1
K ₂ HPO ₄	0,065	0,065	0,065	0,065
Дрожжевой экстракт	0,2	0,2	0,2	0,2
Агар	2,0	2,0	2,0	2,0
Ферментолит лузги (3,5% ПВ)	–	60,0	–	–
Вода водопроводная	до 100%	до 100%	до 100%	до 100%

Готовую питательную среду с pH (5,0±0,1) стерилизовали в автоклаве при температуре (117±1)°C в течение 40 мин, после стерилизации разливали в стерильные чашки Петри и остужали до полного застывания агара. Засеянные чашки Петри инкубировали в термостате при температуре (30±1)°C и (40±1)°C в течение 48 ч.

Скрининг на жидких питательных средах проводили в колбах Эрленмейера объемом 250 см³ с запол-

нением 50 см³. Во всех колбах была питательная среда следующего состава, %: (NH₄)₂SO₄ – 0,5; MgSO₄ – 0,1; K₂HPO₄ – 0,065; дрожжевой экстракт – 0,2; мел – 0,3; ферментолит подсолнечной лузги (3,5% ПВ) – до 100; pH перед стерилизацией (5,0±0,1); стерилизовали в автоклаве при (117±1)°C в течение 40 мин. Засев колб производили петлей с поверхности скошенного агара. Колбы устанавливали на орбитальный шейкер и инкубировали при температуре (30±1)°C и (40±1)°C в течение 24 и 48 ч.

Штаммы микроорганизмов при глубинном культивировании сравнивали по выходу сухой биомассы с 1 дм³ (весовым методом), конверсии по отношению к потребленным ПВ, содержанию «сырого» протеина (методом Кьельдаля по ГОСТ 20083-74).

Результаты исследования. Скрининг на плотной питательной среде. После инкубирования в термостате чашки Петри подвергли визуальному контролю роста микроорганизма. Количественно определить рост на агаризованной среде не представляется возможным, поэтому рост оценивали визуально, каждой культуру выставляли определенное количество «плюсов» («+++» – обильный рост, «++» – рост хороший, «+» – рост удовлетворительный, «–» – рост отсутствующий). Полученные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Визуальная оценка роста дрожжевых культур на агаризованной питательной среде

Штамм-продукт	Визуальная оценка роста			
	Контроль	ПС-1	ПС-2	ПС-3
<i>Candida tropicalis</i> RCAM1050	+++	+++	++	+++
<i>Candida blancii</i> RCAM3343	+++	+++	++	+++
<i>Candida blancii</i> RCAM3360	+++	+++	+	++
<i>Candida utilis</i> Y-797	+++	+++	++	+++
<i>Candida parapsilopsis</i> D-18	+++	+++	+++	+++
<i>Wickerhamomyces anomala</i> RCAM1039	+++	++	–	++
<i>Guechomyces pollulans</i> RCAM03356	+++	++	–	+
<i>Cutaneotrichosporon cutaneum</i> RCAM03569	+++	+++	+	++
<i>Cylerindnera</i> sp. RCAM03502	+++	++	+	+
<i>Hansenula polymorpha</i> D-21	+++	+++	+	++
<i>Debaryomyces hansenii</i> Y-2519	+++	+++	+	++
<i>Debaryomyces hansenii</i> Y-3863	+++	+++	+	+++
<i>Debaryomyces hansenii</i> D-15	+++	+++	+	+++
<i>Kluyveromyces lactis</i> Y-4444	+++	++	+	++
<i>Kluyveromyces marxianus</i> Y-4557	+++	+++	++	+++
<i>Kluyveromyces marxianus</i> Y-4570	+++	+++	++	+++
<i>Pichia membranifaciens</i> D-17	+++	+++	++	++
<i>Pichia kudriavzevii</i> Y-3918	+++	+++	+	+
<i>Zygosaccharomyces bailii</i> D-16	+++	–	–	–

По результатам скрининга было определено, что многие исследуемые штаммы с трудом ассимилируют целлюлозу, а три из них не усваивают ее полностью, особенно в качестве единственного источника углерода в питательной среде. Внешний вид чашек Петри с выросшей культурой микроорганизма на ПС-1 представлен на рисунке 1 и на ПС-2 представлен на рисунке 2.

Скрининг на жидкой питательной среде. Культивирование исследуемых штаммов проводили в колбах Эрленмейера на орбитальном шейкере при 390 об/мин. Штаммы сравнивали по выходу сухой биомассы с 1 дм³ и содержанию «сырого» протеина. Полученные данные представлены в таблице 3.

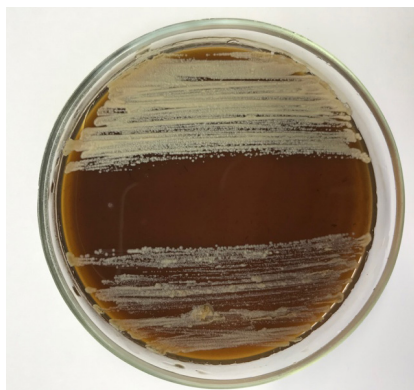


Рисунок 1 – Внешний вид выросших дрожжевых культур на ПС-1 (слева – *Cylerindnera* sp. RCAM03502 («+++»), справа – *Debaryomyces hansenii* Y-2519 («+++»))

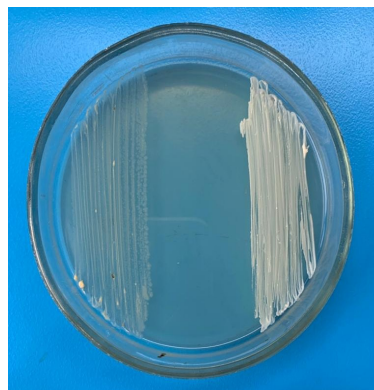


Рисунок 2 – Внешний вид выросших дрожжевых культур на ПС-2 (слева *Kluyveromyces lactis* Y-4444 («+»), справа – *Candida parapsilopsis* D-18 («+++»))

Таблица 3 – Результаты скрининга дрожжевых культур на жидкой питательной среде

Исследуемый штамм	Температура культивирования	24 часа роста		48 часов роста	
		Выход сухой биомассы, г/дм ³	Содержание сырого протеина, % к АСВ	Выход сухой биомассы, г/дм ³	Содержание сырого протеина, % к АСВ
<i>Candida tropicalis</i> RCAM1050	30°C	17,6	42,5	28,8	40,2
	40°C	19,2	47,2	26,2	44,3
<i>Candida blancii</i> RCAM3343	30°C	16,1	45,4	30,6	44,2
	40°C	16,4	46,9	27,4	45,3
<i>Candida blancii</i> RCAM3360	30°C	19,2	42,3	21,19	41,3
	40°C	18,6	42,5	26,37	41,2
<i>Candida utilis</i> Y-797	30°C	15,4	47,7	21,8	42,6
	40°C	3,27	–	3,39	–
<i>Candida parapsilopsis</i> D-18	30°C	24,4	42,4	23,9	43,7
	40°C	23,3	44,7	27,6	43,6
<i>Wickerhamomyces anomala</i> RCAM1039	30°C	17,6	51,2	24	47,9
	40°C	–	–	–	–
<i>Guechomyces pollulans</i> RCAM03356	30°C	13,6	46,3	16,1	44,6
	40°C	–	–	–	–
<i>Cutanitrichosporon cutaneum</i> RCAM03569	30°C	10,6	37,4	20,1	39,2
	40°C	–	–	–	–
<i>Cylerindnera</i> sp. RCAM03502	30°C	7,1	35,5	11,1	37,7
	40°C	–	–	–	–
<i>Hansenula polymorpha</i> D-21	30°C	10,2	52,1	16,4	56,5
	40°C	10,6	53,4	17,6	57,8
<i>Debaryomyces hansenii</i> Y-2519	30°C	12,7	48,2	21,7	46,7
	40°C	–	–	–	–
<i>Debaryomyces hansenii</i> Y-3863	30°C	17,1	54,1	24,1	53,9
	40°C	–	–	–	–
<i>Debaryomyces hansenii</i> D-15	30°C	8,6	58,2	11,5	59,6
	40°C	–	–	–	–
<i>Kluyveromyces lactis</i> Y-4444	30°C	12,7	44,3	12,5	46,7
	40°C	10,3	46,8	14,3	46,9
<i>Kluyveromyces marxianus</i> Y-4557	30°C	14,3	45,2	19,2	45,2
	40°C	18,45	47,3	24,2	47,2

Все исследуемые штаммы дрожжей являются быстрорастущими. Если ферментализат в питательной среде заменить на глюкозу, то во всех вариантах через 24 ч культивирования количество РВ будет равно 0%. У всех штаммов количество остаточных РВ отлично от 0%, следовательно, в среде остались дисахара, относящиеся к редуцирующим, но на ассимиляцию которых дрожжам может потребоваться больше времени. С целью подтвердить эту гипотезу, время культивирования для исследуемых штаммов увеличили в 2 раза до 48 ч.

Увеличение времени культивирования в два раза привело к тому, что большинство штаммов потребило большее количество редуцирующих веществ, что привело к увеличению количества сухой биомассы и в 30% культур наблюдалось повышение содержания сырого протеина в биомассе. Все исследуемые дрожжевые культуры относятся к мезофилам, однако были

выявлены штаммы не способные развиваться при температуре 40°C. В процессе культивирования дрожжей образуется большое количество тепла. Избыточное тепло необходимо отводить. В масштабах колб и не больших ферментеров (до 10 м³) этим теплом можно пренебречь и выбрать штамм способный расти при любой температуре, однако для больших аппаратов держать температуру не выше 30°C очень затратно, поэтому для крупнотоннажного производства преимущественно выбирать термотолерантные мезофилы (способные расти при 40°C). В этом случае затраты на охлаждение дрожжерастильного аппарата будут значительно ниже. Среди культур с оптимальной температурой роста 40°C оказались все представители рода *Candida*, кроме *Candida utilis*. Дрожжи родов *Kluyveromyces* и *Pichia* и единственный представитель рода *Hansenula* так же оказались термотолерантными мезофилами. Напротив, дрожжи рода *Debaryomyces*

и штаммы из коллекции Всероссийского научно-исследовательского института сельскохозяйственной микробиологии (RCAM) оказались способны расти только при температуре 30°C.

Следующим критерием отбора для потенциальных продуцентов была максимальная ассимиляция восстанавливающих сахаров среды. Все штаммы, кроме *Guechomyces pollulans* RCAM03356 (0,8% PB), *Cylerlindnera* sp., *Hansenula polymorpha* D-21 (0,72% PB), *Debaryomyces hansenii* D-15 (0,7% PB), утилизируют редуцирующие вещества практически полностью. Если в культуральной жидкости присутствуют остаточные сахара, то необходимо производить дополнительную очистку фильтрата перед сбросом в канализацию, либо проводить двухстадийное культивирование с использованием двух штаммов. На первой стадии культивируется выбранный продуцент, неполностью утилизирующий сахара, на второй стадии происходит культивирование другого продуцента на фильтрате культуральной жидкости. Двухстадийная технология требует дополнительных капитальных затрат на оборудование и коммуникации, данный процесс не целесообразно внедрять на дрожжевом производстве из экономических соображений. Исходя из этого указанные выше штаммы не могут быть рассмотрены в качестве продуцентов кормового белка при разработке промышленной технологии.

Важнейшими показателями при отборе промышленных культур является количество образующейся сухой биомассы с 1 дм³ питательной среды и высокое содержание в ней сырого протеина. Эти параметры являются ценообразующими для будущей технологии. От содержания сырого протеина в биомассе зависит рыночная цена данного продукта. Для примера цена 1 кг кормовых дрожжей с содержанием сырого протеина 40 – 50% составляет 17 – 19 руб. В то же время при содержании сырого протеина 60 – 65% цена 1 кг доходит до 55 – 60 руб. Очевидно, что количество образующейся биомассы и содержание в ней сырого протеина в большей степени зависит не от самой культуры, а от условий ее культивирования. Важно сбалансированное содержание в питательной среде азота, фосфора, калия, магния и других макро- и микроэлементов. Работа по оптимизации и подбору оптимальных условий культивирования той или иной культуры очень долгая и кропотливая работа. На этапе первичного отбора необходимо определить потенциал штамма, для этого все культуры помещены в единые условия культивирования.

Среди факультативных мезофилов выделяются дрожжи рода *Debaryomyces* и *Wickerhamomyces anomala*. Количество сухой биомассы для данных культур превышает 20 г/дм³ содержание сырого протеина выше 45% и достигает 53% для штамма Y-3863.

Среди термотолерантных мезофилов выделяются представители трех родов: *Candida*, *Kluyveromyces* и *Pichia*. Дрожжи *Candida* исторически являются самыми распространенными на гидролизных производствах. При культивировании их на ферментализате

подсолнечной лузги количество дрожжевой биомассы варьировалось от 26 г/дм³ до 32 г/дм³. По количеству образующейся биомассы дрожжи этого рода являются неоспоримыми лидерами, однако содержание сырого протеина в биомассе не велико и не превышает 45%. Большое количество сырого протеина до 54% накапливают дрожжи рода *Pichia*, количество биомассы не велико и составляет 16 – 18 г/дм³. Золотой серединой между этими родами являются представители *Kluyveromyces*. Так называемые «молочные дрожжи» способны накапливать до 24 г/дм³ сухой биомассы, содержащей до 48% сырого протеина.

Полученные данные позволяют сделать вывод, о том, что подсолнечная лузга может быть использована в качестве субстрата, при этом полученная дрожжевая биомасса представляет собой интересный коммерческий продукт, превосходящий имеющиеся аналоги. Близким аналогом к полученному продукту является [5], основным недостатком данного способа является получение кормовой добавки с низким (не более 20%) содержанием сырого протеина.

Заключение. В результате проведения скрининга потенциальных продуцентов белка для дальнейшей работы по разработке технологии получения высококачественной биомассы были выбраны следующие штаммы: *Kluyveromyces marxianus* Y-4557, *Debaryomyces hansenii* Y-3863, *Candida blancii* RCAM3343, *Candida parapsilopsis* D-18. Первые два штамма могут использоваться для получения белковых концентратов и изолятов. Дрожжи рода *Candida* возможно использовать только в качестве продуцентов кормового белка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Банницына Т. Е. и др. Дрожжи в современной биотехнологии // Вестник Международной академии холода. – 2016. – № 1.
2. Кисаримов А. А. Применение дрожжей в пищевой промышленности // НИРС-первая ступень в науку. – 2017. – С. 130-133.
3. Кленова, И. А. Экологические подходы к оценке безвредности нетрадиционных белковых продуктов // И. А. Кленова, Д. А. Рудиков. – Текст : непосредственный // Заметки ученого. – Ростов-на-Дону : Общество с ограниченной ответственностью "Приоритет", 2016. – № 7. – С. 132-137.
4. Матеев Е.З., Королькова Н.В., Константинов В.Е. и др. 2017. Тенденции и инновации при производстве и переработке масличных культур. Вестник Воронежского государственного аграрного университета № 3(54). С. 123-131.
5. Патент № 507632, C12N 1/38 C12N 1/22 C12R 1/72. Способ получения биомассы кормовых дрожжей. Решетник О. С., Стребков Н. П., Победимский Д. Г. и др. опубликован 07.04.1984.
6. Султанова М.Ж., Абдрахманов Х.А., Кизатова М.Е., Боровский А.Ю. 2019. Виды утилизации отходов масличных культур. Colloquium-journal № 19-2(43). С. 21-23.
7. Харьков В.В., Тунцев Д.В., Кузнецов М.Г. 2018. Термостойкая переработка лузги подсолнечника Вестник Казанского государственного аграрного университета № 4(13). С. 130-134.
8. Adams R., Van Bogaert L., Ecken H. 1994. Striatonigral degeneration. Journal of Neuropathology and Experimental Neurology, 23, 584-593.
9. Aguilar B. et al. 2012. Characterization of Cell Wall Extracts from *Saccharomyces cerevisiae* with Immunological Activity. Food Biotechnology № 4 (26).
10. Binetti A. Yeasts from autochthonal cheese starters: Technological and functional properties // Journal of Applied Microbiology. 2013. № 2 (115).
11. Hsu S. A., Chou J. Y. Yeasts in fermented food and kefir: In vitro characterization of probiotic traits // Journal of Animal and Plant Sciences. 2021. № 2 (31).

12. De-Paula, O.C., Marzinek, J., Oliveira, D.M.T. 2013. The role of fibres and the hypodermis in Compositae melanin secretion. *Micron*, 44, 312-316.
13. Ha C.H. et al. 2006. Preparation and analysis of yeast cell wall mannoproteins, immune enhancing materials, from cell wall mutant *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Microbiology and Biotechnology* № 2(16).
14. Haiman E.T., Frank H. 1994. Eine eintachementhod. Zurbestimmung dereasserbindung in Muskel Dio *Naturwissenschaften* № 40. C. 29.
15. Henchion M. et al. 2017. Future protein supply and demand: Strategies and factors influencing a sustainable equilibrium. *Foods* № 7(6).
16. Johansen P.G. et al. 2019. Occurrence and Importance of Yeasts in Indigenous Fermented Food and Beverages Produced in Sub-Saharan Africa. *Frontiers in Microbiology* № 10.
17. Kogan G., Kocher A. 2007. Role of yeast cell wall polysaccharides in pig nutrition and health protection *Livestock Science* №. 1-3(109). C. 161-165.
18. Lehnhardt A., Kemper M.J. 2011. Pathogenesis, diagnosis and management of hyperkalemia. *Pediatric Nephrology* № 3(26).
19. Ogbuewu I.P. et al. 2019. Yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) and its effect on production indices of livestock and poultry – a review. *Comparative Clinical Pathology* №. 3(28). C. 669-677.
20. Shin Y., Tamai Y., Terazawa M. 2000. Chemical constituents of *Inonotus obliquus* III. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 2(3), 201–207.
21. Shin Y., Tamai Y., Terazawa M. 2001. Triterpenoids, steroids and a new sesquiterpen from *Inonotus obliquus* (Pers.: Fr.) Bond. et Sing. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 4(3), 250-256.
22. Shujing, S., Zhang, X., Sun, S., Zhang, L., Shan, S., Zhu, H. 2015. Production of natural melanin by *Auricularia auricula* and study on its molecular structure, *Food Chemistry*, 190, 801-807.
23. Shurson G.C. 2018. Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: Sources, characteristics, animal responses, and quantification methods. *Animal feed science and technology* № 235. C. 60-76.
24. Zheng Y. et al. 2021. Fractionation and identification of salty peptides from yeast extract. *Journal of Food Science and Technology* № 3(58).

Статья поступила в редакцию 28.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 664.65

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0028

РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ И ТЕХНОЛОГИИ МАФФИНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНУЛИНА И ЧЕРЕШКОВ СЕЛЬДЕРЕЯ

© 2021

Копылова Анастасия Валерьевна, старший преподаватель
кафедры технологии и организации пищевых производств

Сапожников Александр Николаевич, кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии и организации пищевых производств

Новосибирский государственный технический университет

(630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, e-mails: kopylova@corp.nstu.ru, a.sapozhnikov@corp.nstu.ru)

Давыденко Наталия Ивановна, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры технологии и организации общественного питания

Кемеровский государственный университет

(650043, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, e-mail: nat1861@yandex.ru)

Аннотация. Мучные изделия пользуются стабильно высоким спросом среди населения России. Они реализуются повсеместно и имеют сравнительно невысокую цену. Вместе с тем, их недостатком является высокая калорийность и низкое содержание многих макро- и микронутриентов. Одним из популярных сдобных мучных изделий, реализуемых на российском потребительском рынке, являются маффины. Результаты проведенных в России и за рубежом исследований показывают целесообразность разработки новых рецептов маффинов, в которых перспективными для использования ингредиентами могут являться порошок из черешков сельдерея инфракрасной (ИК) сушки и инулин. В образцы разрабатываемых изделий инулин вносился в количестве 10% от массы пшеничной муки, порошок сельдерея ИК-сушки – в количестве 2,5%; 5,0% и 7,5% от массы пшеничной муки. Результаты анализа показали, что введение данных ингредиентов не снижает органолептических показателей в экспериментальных образцах, при этом при увеличении введения доли порошка вкус у изделий становится более кислым и соленым, что может быть нежелательным для потребителей, но при этом он остается приемлемым. Вследствие этого доля внесения порошка сельдерея ИК-сушки в рецептуру маффинов может составлять как 5,0%, так и 7,5% от массы пшеничной муки высшего сорта. Данное количество порошка в наибольшей степени увеличивает содержание в образцах витамина С и бета-каротина – на 4,9...7,5% и на 10,4...16% соответственно. По ряду витаминов, минеральных веществ и пищевых волокон образцы изделий обладают функциональными свойствами. В дальнейшем для оптимизации рецептов маффинов следует рассмотреть возможность увеличения доли введения инулина и добавления дополнительных ингредиентов, которые улучшат органолептические свойства и пищевую ценность маффинов, а также расширят их ассортимент.

Ключевые слова: маффины, мучные изделия, сельдерей, инулин, инфракрасная сушка.

DEVELOPMENT OF FORMULATION AND PRODUCTION TECHNOLOGY OF MUFFINS WITH THE USE OF INULIN AND CELERY STALKS

© 2021

Kopylova Anastasiia Valer'evna, senior lecturer of technology and organization of food industries department

Sapozhnikov Aleksandr Nikolayevich, candidate of technical sciences,
senior lecturer of technology and organization of food industries department

Novosibirsk State Technical University

(630073, Russia, Novosibirsk, Pr. K. Marksa, 20, e-mails: kopylova@corp.nstu.ru, a.sapozhnikov@corp.nstu.ru)

Davydenko Natalia Ivanovna, doctor of technical sciences, associate professor,
professor of technology and organization of public catering department

Kemerovo State University

(650043, Russia, Kemerovo, Krasnaya str., 6, e-mail: nat1861@yandex.ru)

Abstract. Flour products are in consistently high demand among the population of Russia. They are sold everywhere and have a relatively low price. At the same time, their disadvantage is high calorie content and low content of many macro- and micronutrients. One of the most popular pastry products sold on the Russian consumer market are muffins. The results of research conducted in Russia and abroad show the feasibility of developing new recipes for muffins, in which powder from celery stalks of infrared (IR) drying and inulin can be promising ingredients for use. Inulin was added to the samples of the developed products in an amount of 10% by weight of wheat flour, IC-dried celery powder in an amount of 2.5%; 5.0% and 7.5% by weight of wheat flour. The results of the analysis showed that the introduction of these ingredients does not reduce the organoleptic parameters in experimental samples, while with an increase in the introduction of the proportion of powder, the taste of the products becomes more acidic and salty, which may be undesirable for consumers, but at the same time it remains acceptable. As a result, the proportion of introducing IC-dried celery powder into the muffin recipe can be either 5.0% or 7.5% of the weight of premium wheat flour. This amount of powder increases the content of vitamin C and beta-carotene in the samples to the greatest extent – by 4.9...7.5% and

by 10.4...16%, respectively. For a number of vitamins, minerals and dietary fibers, product samples have functional properties. In the future, to optimize the recipes of muffins, it is necessary to consider the possibility of increasing the proportion of inulin administration and adding additional ingredients that will improve the organoleptic properties and nutritional value of muffins, as well as expand their range.

Keywords: muffins, bakery products, celery, inulin, infrared drying.

Введение. Рынок мучных изделий является достаточно развитым сегментом российского рынка пищевых продуктов. Данная группа изделий пользуется стабильно высоким спросом, так как обладает сравнительно невысокой ценой и может производиться на предприятиях различной мощности и отраслевой принадлежности. Одним из направлений дальнейшего развития рынка мучных изделий является разработка и практическое внедрение рецептов новых видов изделий, т. е. расширение их ассортимента.

Особенностью мучных изделий, вырабатываемых по традиционным рецептурам, являются их высокие органолептические свойства, но при этом они также обладают высоким содержанием углеводов и высокой калорийностью за счет использования муки высшего сорта и свекловичного сахара, а также пониженным содержанием ряда витаминов, минеральных веществ, незаменимых аминокислот, полиненасыщенных жирных кислот и пищевых волокон [1].

Одним из видов сдобных мучных изделий, реализуемых на российском потребительском рынке, являются маффины. Данный вид изделий имеет появился в Великобритании в XVII в., с XIX в. по сегодняшний день они также стали популярны в странах Европы и Северной Америки. В то же время с 2000-х гг. они стали легко узнаваемыми и пользующимися спросом у российского потребителя наряду с традиционными для России сдобными мучными изделиями. В настоящее время термином «маффин» обозначают порционное сдобное изделие с добавлением яиц, жира и сахара и выходом в среднем от 90 до 130 г, с различными видами начинки или без нее. В сравнении с традиционными кексами маффины отличаются более развитой пористой структурой мякиша, образующейся за счет меньшего количества сахара и жира, и его более высокой влажностью [2].

Как характерные представители сдобных мучных изделий, маффины являются высококалорийным продуктом с пониженным содержанием многих необходимых макро- и микронутриентов. Вместе с тем традиционные рецептуры маффинов являются перспективной основой для их обогащения или модификации. Так, ранее были разработаны рецептуры маффинов, в которых пшеничная мука была частично или полностью заменена на нетрадиционные виды муки: кокосовую [3], льняную [3-5], люпиновую [6], экструдированную пшеничную [7], муку киноа белой [8], муку из семян подсолнечника [9], смесь высокобелковой муки из подсолнечного шрота с концентратом молочного белка [10]. Мука также заменялась частично или полностью на вишневые выжимки [11], порошок из наружных листьев пекинской капусты [12], белковый изолят из семян сезама [13]. Посколь-

ку значительную долю в маффинах составляет сахар, для снижения его содержания в изделиях были разработаны рецептуры с полной или частичной заменой сахара на изомальт и яблочные пищевые волокна [14], инулина в сочетании с глюкозой ферментированной [15], смеси из ребаудиозида А, получаемого из листьев стевии, с пшеничными, яблочными или гороховыми волокнами [16]. Яблочные пищевые волокна также использовались в качестве замены части пшеничной муки в рецептурах маффинов [17].

Не менее актуальным является повышение пищевой ценности маффинов вторичным растительным сырьем, например зародышами пшеницы в сочетании со свекловичными волокнами [18]. Также проводились исследования по применению в маффинах из рисовой муки порошка из грибов шиитаке и морковных выжимок [19]. Нетрадиционным сырьем для маффинов также являются порошки из съедобных насекомых – сверчков и больших мучных хрущаков [20, 21].

Общим результатам для всех вышеуказанных исследований является то, что у готовых изделий повышалась пищевая ценность, улучшались органолептические и реологические показатели.

В условиях российского производства мучных изделий важным является использование доступного сырья повышенной пищевой ценности, в том числе обладающего функциональными свойствами. С этой точки зрения перспективным является использование порошка из черешков сельдерея инфракрасной (ИК) сушки, так как в данном ингредиенте в значительной степени сохраняются содержащиеся в исходном сырье полезные вещества, а также данный продукт положительно влияет на органолептические свойства готовых изделий [22].

Как было отмечено выше, в качестве сахарозаменителя в рецептурах маффинов использовался инулин. При этом целесообразной является частичная замена сахара и жирового компонента на инулин (до 50%), так как при полной замене данных ингредиентов ухудшается текстура и консистенция готовых изделий [23, 24]. Основным источником инулина является топинамбур, откуда он может быть получен в виде препарата, представляющего собой комбинацию инулина и фруктозы [25].

Целью работы являлась разработка рецептуры и технологии производства маффинов с использованием инулина и порошка сельдерея ИК-сушки и оценка их органолептических показателей и пищевой ценности.

Материалы и результаты исследования. Экспериментальные исследования проводились в условиях кафедр технологии и организации пищевых производств Новосибирского государственного технического университета и технологии и организации обще-

ственного питания Кемеровского государственного университета.

Основное и дополнительное сырье – мука пшеничная высшего сорта, сыр твердый, молоко 2,5% жирности, яйца куриные, масло сливочное, сахар белый кристаллический, зелень петрушки, соль пищевая, чеснок, порошок инулина, разрыхлитель, черешки сельдерея – было приобретено в розничной торговой сети г. Новосибирска.

Для получения порошка сельдерея ИК-сушки подготовленные черешки нарезают, после чего подвергают сушке в сушилке инфракрасной (патент РФ № 2265169) [26] при температуре 50...60 °С в течение 2,5...3 ч в импульсном режиме, после чего охлаждали, досушивали при нормальных условиях и механически измельчали до состояния тонкодисперсного порошка (размер частиц менее 0,5 мм). Под импульсным режимом подразумевается автоматическое включение и выключение ламп при достижении фиксированной температуры.

В конструкции сушилки источником ИК-излучения являются кварцевые галогенные лампы КГТ-220-1000 трубчатой конфигурации, расположенные в боковых отражателях сушильной камеры.

Было приготовлено 4 образца изделия:

- образец № 1 – маффин с инулином (контроль);
- образец № 2 – маффин с инулином, с применением 2,5% порошка сельдерея;
- образец № 3 – маффин с инулином, с применением 5,0% порошка сельдерея;
- образец № 4 – маффин с инулином, с применением 7,5% порошка сельдерея.

Инулин вводился в изделия в количестве 10% от основного ингредиента – муки пшеничной.

Для приготовления образцов маффинов все ингредиенты проходили первичную обработку. Затем сахар, соль, разрыхлитель, инулин и порошок черешков сельдерея ИК-сушки (в экспериментальных образцах) перемешивали с мукой, постепенно вводили в смесь предварительно соединенные яйца куриные, молоко и растопленное сливочное масло. Сыр натерли на крупной терке, смешивали с оставшейся массой, добавляли натертый чеснок и мелко нарезанную зелень петрушки и повторно перемешивали. Формы для выпечки заполняли полученным тестом на 2/3 объема, после чего выпекали при температуре 170 °С и влажности 7% в течение 20 мин.

В работе использовали общепринятые и стандартные методы исследований органолептических показателей и пищевой ценности мучных изделий.

Готовые мафины после охлаждения в естественных условиях до температуры 20...25 °С и оценивались по органолептическим показателям. Органолептическая оценка образцов осуществлялась в периоде 1,5...3 ч с момента окончания технологического процесса в соответствии с требованиями ГОСТ 31986–2012 «Услуги общественного питания. Метод органолептической оценки качества продукции общественного питания» специально созданной дегустаци-

онной комиссией, состоящей из 10 человек.

Образцы оценивались по показателям внешнего вида, консистенции, цвета, вкуса и запаха. Каждый показатель оценивался в диапазоне от 1 до 5 баллов, где наименьшим баллом был 1, наивысшим – 5.

В отношении показателей вкуса и запаха как наиболее характерных критериев при выборе мучных кондитерских изделий потребителем был применен дескрипторно-профильный метод.

Используемый метод способствует получению объективной оценки при анализе отдельных свойств образцов, что в дальнейшем позволит их регулировать в процессе изменений и совершенствования рецептур и технологий вырабатываемых изделий [27]. Для каждой характеристики показателя принималась оценка до 0 до 5 баллов, где 5 баллов означали наиболее выраженную характеристику вкуса и запаха, 0 баллов – отсутствие соответствующей характеристики вкуса и запаха.

Пищевая ценность образцов определялась расчетным способом на основе справочных данных из справочника «Химический состав и калорийность российских продуктов питания» (2012) [28], при этом учитывались потери пищевых веществ при тепловой обработке.

Результаты органолептической оценки образцов маффинов представлены на рисунке 1.

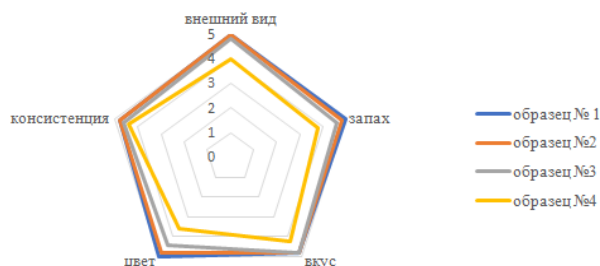


Рисунок 1 – Органолептическая оценка образцов маффинов

Согласно данным органолептической оценки, введение порошка из черешков сельдерея ИК-сушки в тесто для маффинов в количестве 2,5% и 5,0% (образцы № 2, 3) существенно не изменяет показатели качества изделий. При этом при увеличении вложения порошка ИК-сушки сельдерея в количестве 7,5% (образец № 4) показатели внешнего вида, цвета, вкуса и запаха снижаются в среднем на 0,9 балла ввиду специфических свойств сельдерея.

Результаты профильно-дескрипторного анализа вкуса и запаха образцов маффинов показаны соответственно на рисунках 2 и 3.

Добавление порошка ИК-сушки черешков сельдерея в тесто для маффинов способствует тому, что вкус опытных образцов становится менее сладким, более пряным и соленым. В свою очередь, при увеличении доли внесения порошка в тесто запах образцов становится более интенсивным и специфичным, при этом в наибольшей степени это выражено у образца № 4.

Расчет пищевой ценности образцов полуфабриката заварного представлен в таблице 1.

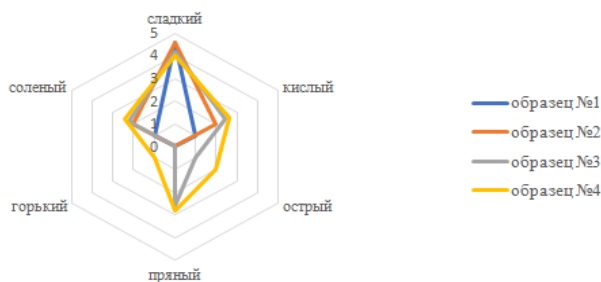


Рисунок 2 – Профильно-дескрипторный анализ вкуса образцов маффинов

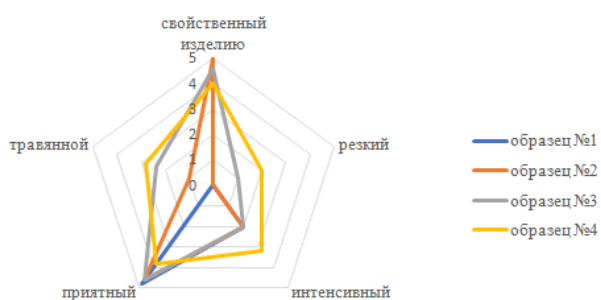


Рисунок 3 – Профильно-дескрипторный анализ запаха образцов маффинов

Таблица 1 – Расчет пищевой ценности образцов маффинов

Наименование пищевых веществ	Суточная норма	Образец № 1		Образец № 2		Образец № 3		Образец № 4	
		Содержание в 1 порции	% от суточной нормы	Содержание в 1 порции	% от суточной нормы	Содержание в 1 порции	% от суточной нормы	Содержание в 1 порции	% от суточной нормы
Белки, г	75	9,2	15,4	9,2	15,4	9,1	9,1	9,3	15,5
Жиры, г	83	6,6	9,7	6,6	9,7	6,6	6,6	6,7	9,8
Углеводы, г	211	22,7	12,3	22,2	12,1	21,8	21,8	21,7	11,8
Пищевые волокна, г	30	2,77	9,2	2,84	9,5	2,9	9,7	3,0	10,1
Энергетическая ценность, ккал	2500	187	11,2	185	11,2	183	11,1	185	11,2
Минеральные вещества, мг									
Na	1300	295,6	22,7	307,2	23,6	318,8	24,5	336,2	25,9
K	2500	87,5	3,5	111,4	4,5	135,3	5,4	161,9	6,5
Ca	1000	244,6	24,5	248,6	24,9	252,6	25,3	261,2	26,1
Mg	400	20,0	5,0	22,8	5,7	25,5	6,4	28,8	7,2
P	800	185,3	23,2	189,0	23,6	192,7	24,1	199,9	25,0
Fe	10	0,79	7,9	0,86	8,6	0,92	9,2	1,0	10,1
Витамины, мг									
B ₁	1,5	0,07	4,9	0,07	4,9	0,07	4,8	0,07	4,9
B ₂	1,8	0,15	8,1	0,15	8,1	0,16	8,7	0,17	9,2
PP	20	0,49	2,5	0,5	2,5	0,52	2,6	0,54	2,7
C	90	1,05	1,2	3,25	1,2	5,45	6,1	7,79	8,7
бета-каротин	5	0,11	2,1	0,11	2,1	0,63	12,5	0,9	18,1

Анализ результатов расчета показывает, что увеличение доли вводимого порошка черешков сельдерея ИК-сушки практически не изменяет пищевую ценность продукции: содержание белков и

жиров в готовом изделии, а также его энергетическую ценность не меняются, содержание углеводов уменьшается на 0,2...0,5%, а содержание пищевых волокон увеличивается на 0,3...0,9%. С увеличением доли порошка в образцах увеличивается содержание натрия, калия, кальция, магния, фосфора и железа на 2...3%, витаминов B₂ – на 0,6...1,1%, PP – на 0,1...0,2% (для образцов №№ 3, 4). В наибольшей степени увеличивается содержание витамина C – на 4,9...7,5% и бета-каротина (провитамина A) – на 10,4...16%. По содержанию в образцах №№ 3, 4 натрия, кальция, фосфора и бета-каротина в количествах более 15% от рекомендуемой суточной нормы можно сделать вывод, что данный образец обладает функциональными свойствами, а пищевым волокнам, калию, магнию, железу и витамину C является источником данных нутриентов, так как их значения находятся в диапазоне 5...15%. Таким образом, дальнейшие исследования могут быть продолжены в увеличении доли внесения инулина как фактора, влияющего на увеличение содержания пищевых волокон в готовом изделии.

Заключение. В результате проведенного исследования была доказана целесообразность использования порошка черешков сельдерея ИК-сушки в сочетании с инулином в рецептуре и технологии маффинов, так как данные ингредиенты улучшают или сохраняют органолептические свойства и пищевую ценность изделий.

При увеличении доли вносимого порошка ИК-сушки черешков сельдерея 7,5 % и более у изделий возникает более кислый и соленый вкус. Это является нежелательным, так как может снижать вкусовые свойства изделий для некоторых потребителей. При этом вкус образца изделий остается приемлемым. Таким образом, внесение порошка сельдерея ИК-сушки в рецептуру маффинов может составлять как 5,0%, так и 7,5% от массы пшеничной муки высшего сорта.

Введение порошка черешков сельдерея ИК-сушки в количестве 5,0% и 7,5% в наибольшей степени увеличивает содержание в образцах витамина C и бета-каротина – на 4,9...7,5% и на 10,4...16% соответственно. По ряду витаминов, минеральных веществ и пищевых волокон образцы изделий обладают функциональными свойствами. В дальнейшем для оптимизации рецептур маффинов также следует рассмотреть возможность увеличения доли введения инулина и добавления дополнительных ингредиентов, которые улучшат органолептические свойства и пищевую ценность изделий, а также расширят их ассортимент.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Могильный М. П. Рациональное использование новой продукции в организованном питании / М. П. Могильный, Т. Ш. Шалтумаев, А. М. Могильный // Вопросы питания. – 2015. – Т. 84, № S3. – С. 139.
2. Бобков В. Маффины – маленькое лакомство для большого удовольствия / В. Бобков // Хлебопродукты. – 2010. – № 10. – С. 46–47.
3. Муравьева Ю. С. Использование кокосовой муки

- и семени льна при производстве маффинов повышенной пищевой ценности / Ю. С. Муравьева, О. В. Черкасов // Образование и наука без границ: фундаментальные и прикладные исследования. – 2017. – № 6. – С. 254–258.
4. Миневич И. Э. Разработка рецептур и оценка качества мучных кондитерских изделий «Льняной маффин» / И. Э. Миневич, Л. Л. Осипова // Хлебопродукты. – 2018. – С. 44–46.
5. Kaur R. Microstructural, physicochemical, antioxidant, textural and quality characteristics of wheat muffins as influenced by partial replacement with ground flaxseed / R. Kaur, M. Kaur // LWT – Food Science and Technology. – 2018. – Vol. 91. – P. 278–285. – DOI: 10.1016/j.lwt.2018.01.059.
6. Nasar-Abbas S. M. Effect of lupin flour incorporation on the physical and sensory properties of muffins / S. M. Nasar-Abbas, V. Jayasena // Quality Assurance and Safety of Crops & Foods. – 2012. – Vol. 4, iss. 1. – P. 41–49. – DOI: 10.1111/j.1757-837X.2011.00122.x.
7. Балаева Е. В. Совершенствование технологии производства кексов и маффинов с использованием крахмалосодержащего сырья / Е. В. Балаева, С. В. Краус // Техника и технология пищевых производств. – 2013. – № 3(30). – С. 3–8.
8. Наумова Н. Л. Оценка пищевой полноценности маффина при использовании цельнозерновой муки киноа белой / Н. Л. Наумова // Инновации и продовольственная безопасность. – 2020. – № 3(29). – С. 47–53. – DOI: 10.31677/2311-0651-2020-29-3-47-53.
9. Grasso S. Quality of muffins enriched with upcycled defatted sunflower seed flour / S. Grasso, S.-Y. Liu, L. Methven // LWT – Food Science and Technology. – 2020. – Vol. 119. – Art. 108893. – DOI: 10.1016/j.lwt.2019.108893.
10. Бобождонова Г. А. Разработка рецептурного состава обогащенного маффина / Г. А. Бобождонова, М. И. Тумин // Товаровед продовольственных товаров. – 2021. – № 9. – С. 694–697. – DOI: 10.33920/igt-01-2109-07.
11. Bajerska J. The effects of muffins enriched with sour cherry pomace on acceptability, glycemic response, satiety and energy intake: a randomized crossover trial / J. Bajerska, S. Mildner-Szkudlarz, P. Gornas, D. Seglina // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2016. – Vol. 96, iss. 7. – P. 2486–2493. – DOI: 10.1002/jsfa.7369.
12. Heo Y. Muffins enriched with dietary fiber from kimchi by-product: baking properties, physical–chemical properties, and consumer acceptance / Y. Heo, M.-J. Kim, J.-W. Lee, B. Moon // Food Science & Nutrition. – 2019. – Vol. 7, iss. 5. – P. 1778–1785. – DOI: 10.1002/fsn3.1020.
13. Sibte-Abbas M. Addition of sesamum indicum protein isolates improves the nutritional quality and sensorial attributes of wheat flour muffins / M. Sibte-Abbas, M. S. Butt, M. R. Khan, M. Shahid // Progress in Nutrition. – Vol. 20, iss. 2. – P. 241–247. – DOI: 10.23751/pn.v20i2.6363.
14. Белова Е. О. Разработка технологии апельсиновых маффинов функционального назначения / Е. О. Белова, М. Ф. Шутилова, Ф. В. Шутилов // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2016. – № 14. – С. 271–283.
15. Тарасова В. В. Разработка рецептуры маффинов с увеличенным сроком хранения / В. В. Тарасова, Ю. В. Николаева, Л. А. Крылова // Пищевая промышленность. – 2021. – № 3. – С. 12–18. – DOI: 10.24412/0235-2486-2021-3-0021.
16. Struck S. Fiber enriched reduced sugar muffins made from iso-viscous batters / S. Struck, L. Gundel, S. Zahn, H. Rohm // LWT – Food Science and Technology. – 2016. – Vol. 65. – P. 32–38. – DOI: 10.1016/j.lwt.2015.07.053.
17. Красина И. Б. Использование пищевых волокон при производстве маффинов / И. Б. Красина, Е. А. Хашпакияз, К. С. Акимова // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2014. – № 2–3 (338–339). – С. 72–75.
18. Самохвалова О. В. Вплив збагачувальних добавок на формування структури тіста та випечених маффінів / О. В. Самохвалова, К. Р. Касабова, С. Г. Олійник // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 1, № 10(67). – С. 32–36.
19. Olawuyi I. F. Quality and antioxidant properties of functional rice muffins enriched with shiitake mushroom and carrot pomace / I. F. Olawuyi, W. Y. Lee // International Journal of Food Science and Technology. – 2019. – Vol. 54, iss. 7. – P. 2321–2328. – DOI: 10.1111/ijfs.14155.
20. Pauter P. Effects of the replacement of wheat flour with cricket powder on the characteristics of muffins / P. Pauter, M. Różańska, P. Wiza, S. Dworczak, N. Grobelna, P. Sarbak, P. Ł. Kowalczewski // Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria. – Vol. 17, iss. 3. – P. 227–233. – DOI: 10.17306/J.AFS.2018.0570.
21. Zielińska E. Nutritional, physicochemical, and biological value of muffins enriched with edible insects flour / E. Zielińska, U. Pankiewicz, M. Sujka // Antioxidants. – 2021. – Vol. 10. – Art. 1122. – DOI: 10.3390/antiox10071122.
22. Kopylova A. V. The use of celery stalks powder of infrared drying in bakery products / A. V. Kopylova, O. K. Motovilov, A. N. Sapozhnikov, T. A. Levin, I. Y. Rybakolnikova // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 296 : 1 International Conference on Environmental Sustainability Management and Green Technologies (ESMGT–2021), Novosibirsk, 30 June – 2 July 2021. – Art. 07008. – DOI: 10.1051/e3sconf/202129607008.
23. Gao J. R. Effect of sugar replacement with stevianna and inulin on the texture and predictive glycaemic response of muffins / J. R. Gao, M. A. Brennan, S. L. Mason, C. S. Brennan // International Journal of Food Science and Technology. – 2016. – Vol. 51, iss. 9. – P. 1979–1987. – DOI: 10.1111/ijfs.13143.
24. Zahn S. Effect of inulin as a fat replacer on texture and sensory properties of muffins / S. Zahn, F. Pepke, H. Rohm // International Journal of Food Science and Technology. – 2010. – Vol. 45, iss. 12. – P. 2531–2537. – DOI: 10.1111/j.1365-2621.2010.02444.x.
25. Суслинок Г. М. Применение инулинсодержащего препарата из топинамбура в хлебопечении / Г. М. Суслинок, И. Д. Щеголева, О. С. Соколова // Хлебопечение России. – 2014. – № 3. – С. 12–14.
26. Пат. 2265169, Россия; МПК F26B 1/00, F26B 3/30. Сушилка инфракрасная / Волончук С. К. – № 2003136840/06; заявл. 19.12.2003; опубл. 27.11.2005, Бюл. № 33.
27. Матисон В. А. Применение дескрипторно-профильного метода для оценки качества продуктов питания / В. А. Матисон, Н. И. Арутюнова, Е. Д. Горячева // Пищевая промышленность. – 2015. – № 6. – С. 52–54.
28. Тутельян В. А. Химический состав и калорийность российских продуктов питания: Справочник. – М.: ДеЛи плюс, 2012. – 284 с.

Статья поступила в редакцию 01.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 664.65: 347.771: 608.3

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0029

АНАЛИЗ БАЗЫ ПАТЕНТОВ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ ПРОДУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЫРЬЯ РАСТЕНИЯ РОДА БОЯРЫШНИК

© 2021

Сагингалиева Аязжан Галиевна, магистр технических наук
Гумаров Гали Сагингалиевич, доктор технических наук, профессор,
Западно-Казахстанский университет имени М. Утемисова
(090001, Казахстан, г. Уральск, проспект Н.Назарбаева, 162, e-mails: gas9-7@bk.ru, idozkgu@mail.ru)

Коновалов Владимир Викторovich, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технология машиностроения»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/ул.Гагарина, 1а/11, e-mail: kononov-penza@rambler.ru)

Машанова Нурбиби Советовна, доктор технических наук, старший преподаватель
кафедры технологии пищевых и перерабатывающих производств
Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина
(010011, Казахстан, г. Нур-Султан, проспект Женис, 62, e-mail: nurmashanova@gmail.com)

Аннотация. В статье рассматриваются аспекты здорового питания как тренда современного общества, диктующего необходимость научно обоснованных инновационных подходов и разработок в области технологий перерабатывающих производств и пищевых продуктов, пользующихся повышенным спросом у потребителей. Обоснована актуальность тенденций соответствующих разработок, которые основаны на использовании местного нетрадиционного сырья растительного происхождения в качестве обогатителей продуктов питания экологически безопасными биологически активными компонентами. Среди дикорастущих плодовых растений Казахстана одним из ценных и перспективных ресурсов для пищевой промышленности является сырье растения рода боярышник. Данная статья посвящена анализу, систематизации и обобщению патентных данных по использованию сырья растения рода боярышник в различных отраслях промышленности Казахстана, а также выявлению тенденций развития различной продукции содержащих сырьё боярышника. Авторами разработана схема стратегии поиска патентной документации. Выявлены виды сырья растения рода боярышник используемые в производстве товаров. Обозначена общая структура и объединенные классификационные группы продукции, в которых используется сырьё растения боярышник. Обобщена информация по городам Казахстана, в которых наиболее сосредоточены основные разработки продукции с использованием плодов и цветков боярышника. Проведена обработка и систематизация данных по категориям и месторасположению патентообладателей.

Ключевые слова: нетрадиционное сырье, плоды боярышника, патент, описание изобретения, анализ.

ANALYSIS OF THE DATABASE OF PATENTS FOR INVENTIONS OF PRODUCTS USING RAW MATERIALS OF THE HAWTHORN PLANT GENUS

© 2021

Sagingalieva Ayazhan Galieva, master of technical sciences
Gumarov Gali Sagingalieovich, doctor of technical sciences, professor,
Makhambet Utemisov West Kazakhstan University
(090001, Kazakhstan, Uralsk city, Nazarbayev Avenue, 162, e-mails: gas9-7@bk.ru, idozkgu@mail.ru)

Kononov Vladimir Viktorovich, doctor of technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology
Penza State Technological University
(440039, Russia, Penza, Baidukova proezd/Gagarin street, 1a / 11, e-mail: kononov-penza@rambler.ru)

Mashanova Nurbibi Sovetovna, doctor of technical sciences,
Senior Lecturer of the Department of Technology of Food and Processing Industries
S. Seifullin Kazakh Agrarian and Technical University,
(010011, Kazakhstan, Nur-Sultan city, Zhenis Avenue, 62, e-mail: nurmashanova@gmail.com)

Abstract. The article considers aspects of healthy nutrition as a trend of modern society that dictate the need for scientifically based innovative approaches and developments in the field of technologies of processing industries and food products that are in high demand among consumers. The relevance of the trends of the relevant developments, which are based on the use of local non-traditional raw materials of plant origin as food fortifiers with environmentally safe biologically active components, is justified. Among the wild fruit plants of Kazakhstan, one of the most valuable and promising resources for the food industry is the raw material of the plant of the genus hawthorn. This article is devoted to the analysis, systematization and generalization of patent data on the use of raw materials of the plant of the genus hawthorn in various industries of Kazakhstan, as well as identifying trends in the development of various products containing raw materials of hawthorn. The authors have developed a scheme for the search strategy for patent

documentation. The types of raw materials of the plant of the genus hawthorn used in the production of goods are identified. The general structure and combined classification groups of products that use raw materials of the hawthorn plant are indicated. The information on the cities of Kazakhstan, where the main product developments using hawthorn fruits and flowers are most concentrated, is summarized. Processing and systematization of data by category and location of patent holders was carried out.

Keywords: non-traditional raw materials, hawthorn fruit, patent, description of the invention, analysis.

Введение. Сохранение и укрепление здоровья всех слоев населения, строгое обеспечение пищевой безопасности, эффективная профилактика различных заболеваний, обусловленных неполноценным и несбалансированным питанием являются одним из важных целей государственной политики в области здорового питания. Более того, проблема глобального дефицита продуктов питания, ухудшение экологии в большинстве населенных пунктов, рост народонаселения Земли, использование продовольственных сырьевых ресурсов в технических целях, здоровое питание, как тренд современного общества, диктуют необходимость научно обоснованных инновационных подходов и разработок в области технологий перерабатывающих производств и пищевых продуктов, пользующихся повышенным спросом у потребителей. В последнее время этим актуальными тенденциям соответствуют разработки, основанные на использовании местного нетрадиционного сырья растительного происхождения в качестве обогатителей продуктов питания экологически безопасными биологически активными компонентами. И связано это с тем, что они позволяют обеспечить правильный обмен веществ и энергии, и, тем самым, улучшить большинство физиологических процессов протекающих в организме человека, повысить защитные функции организма к неблагоприятным воздействиям окружающей среды и снизить риск заболеваемости [1-4].

Актуальность темы адекватного питания человека с каждым годом существенно возрастает, особенно в современных условиях распространения непрерывных инфекций и заболеваний. Также опасны для человека негативные последствия непрерывных стрессов и стрессовых состояний. Распространенность стресса в мире переросла в острую и сложно решаемую проблему. По статистике, в развитых странах 70% населения находятся в состоянии постоянного стресса, при этом свыше 90% страдают от стресса несколько раз в месяц. Со стрессом связано развитие 80% известных научной медицине заболеваний. Среди источников возникновения стресса некачественное питание занимает второе место. Известно, что только благодаря сбалансированному и разнообразному питанию многие болезни минуют человека или же переносятся им в легкой форме. С точки зрения медицины это объясняется тем, что организм насыщенный разнообразными полезными питательными веществами, аминокислотами, витаминами и минералами имеет стабильно стойкий иммунитет и тогда вся иммунная система качественно поддерживает здоровье человека, превосходно справляется с всякими неприятностями, в том числе очень сложными заболеваниями и инфекциями [1, 2, 5-7].

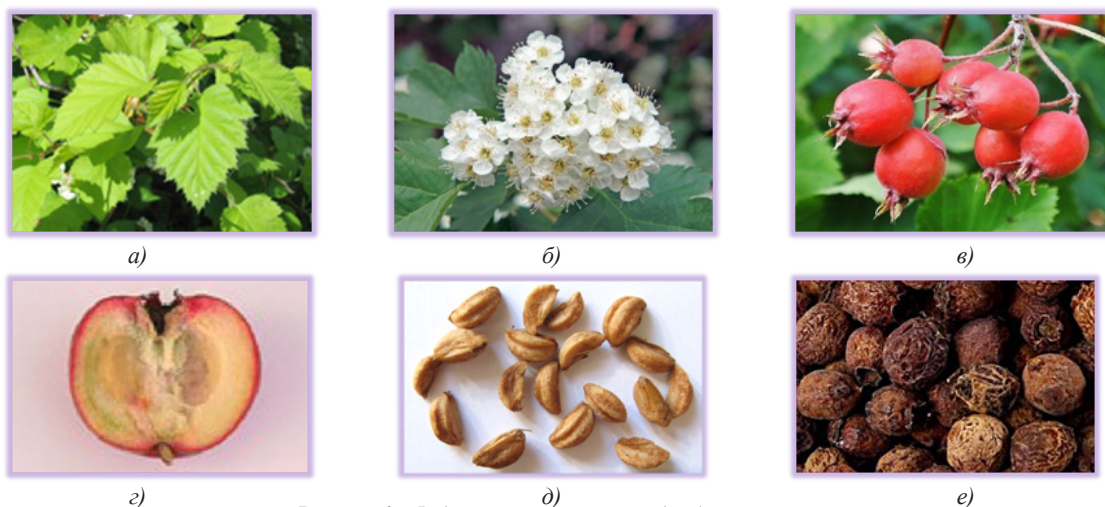
Основными путями улучшения питания различных групп населения являются изменение структуры потребления пищевых продуктов, персонализированное питание, разработка обогащенных биологически ценными ингредиентами хлебобулочных и мучных кондитерских изделий, молочных, мясных продуктов и создание серии функциональных безалкогольных напитков на основе экологически чистого растительного сырья [8-11]. На сегодняшний день разработка и производство функциональных пищевых продуктов, основанных на использовании специфических и нетрадиционных видов местного сырья растительного происхождения, является одним из инновационных способов решения проблемных вопросов обеспечения и оптимизации здорового питания различных групп населения. Трендом последних лет стали приоритеты создания собственной сырьевой базы, использование в производстве различной продукции пищевой промышленности локального для того или иного региона сырья дикорастущих плодово-ягодных растений как в свежем, так и в переработанном виде. Например, ежевики, облепихи, черемухи, рябины, барбариса, голубики, смородины и других [3, 12-17].

Среди дикорастущих плодовых растений Казахстана одним из ценных и перспективных ресурсов для пищевой промышленности является сырье растения рода боярышник [18]. Боярышник – растение в виде кустарника или дерева из семейства розоцветные. Известен на территории умеренных широт североамериканского и евразийского континентов, где он произрастает в основном диком виде. В пределах территории стран содружества независимых государств и Балтии произрастает 56 видов. В Республике Казахстан произрастает 7 видов, в том числе широко применяемый в традиционной и народной медицине колючий и кроваво-красный боярышник [18-20]. Следует отметить, что в Казахстане такая отрасль, как лекарственное растениеводство, находится только на стадии становления и развития. При этом известно, что производство боярышника, как лекарственную культуру начал осуществлять КазНИИЛХА (г. Щучинск) [18].

Боярышник – древнее растение, официально признанное научной медициной, и используется для профилактики и лечения различных заболеваний. В фармацевтической науке рекомендованы к использованию имеющие лекарственную ценность цветки и плоды боярышника. В народной медицине, в национальной кухне различных народов, монастырей используют весь спектр сырья растения боярышник (рис. 1). В мировой народной медицине для изготовления различных препаратов используют листья, кору, цветки, молодые

побеги веточек и свежие или сушеные плоды. Для употребления в пищу, плоды боярышника используют в свежем, замороженном и сушеном виде. При этом у разных народов существуют свои традиции, обычаи и

рецепты. Известно, что из плодов боярышника готовят сыренье, варенье, повидло, джем, желе, мармелад, пастилу и т.д. Кроме того, изготавливают напитки: сок, чай, компот, наливки и вино [21-24].



а)

б)

в)

г)

д)

е)

Рисунок 1 – Виды сырья растения рода боярышник:

а – побег с листьями; б - побег с цветками; в – побег с плодами;
г – плод в разрезе (мякоть с кожисей); д – семена (косточки); е – сушеные плоды.

Цель исследования состояла в проведении анализа, систематизации и обобщение патентных данных по использованию сырья растения рода боярышник в различных отраслях промышленности Казахстана. Вместе с этим результаты исследования позволяют выявить наличие тенденций развития различной продукции содержащих сырьё растения рода боярышник.

Материалы и методы исследования. Объект исследований – описания казахстанских изобретений с 2000 по 2020 гг.

В ходе исследований в качестве теоретических методов использовались общенаучные методы поиска

патентных данных, сопоставления, анализа, синтеза и описания систематизированной информации.

Стратегия поиска патентной документации представлена на рисунке 2.

Процедура поиска и отбора соответствующей нашему запросу информации о патентной документации проводилась по индексам объекта международной патентной классификации. При этом автоматизированный поиск проводился посредством информационно-поисковой системы базы патентов Казахстан с последующей дополнительной ручной обработкой информации.

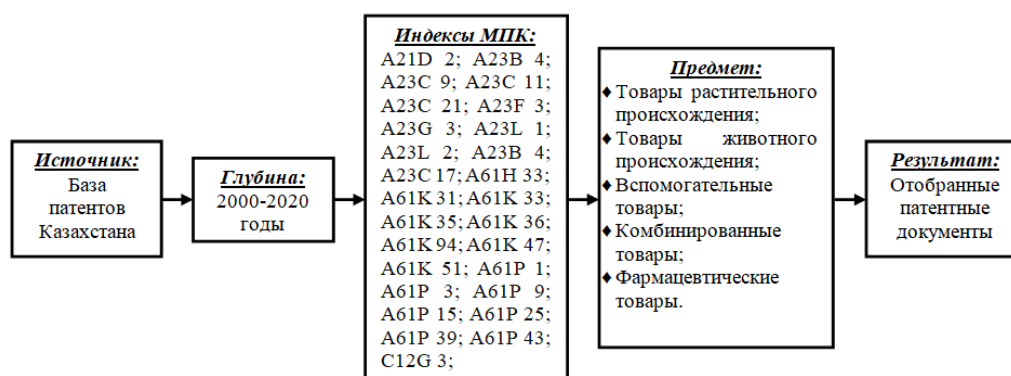


Рисунок 2 – Схема стратегии поиска патентной документации

В трудоемком процессе отбора отвечающих запросу имеющихся в базе патентных документов, из большого массива документов находили те, которые, так или иначе, соответствуют ключевому слову запроса.

В качестве предмета поиска были приняты товары растительного и животного происхождения, вспомогательные и комбинированные товары, а также фармацевтические товары.

Результаты исследований. В результате за анали-

зируемый период в казахстанской патентной базе выявлено всего 44 документа об охране интеллектуальной собственности. Из них национальным заявителям выдано 35, а иностранным 9 патентов. На начальном этапе были изучены библиографические данные выявленных патентных документов, далее рефераты, а при необходимости, и полное описание патентов. При этом обработка и систематизация описаний на изобретения осуществлялось в соответствии следующей

наиболее употребительной классификации [25].

Из потребительских продовольственных товаров (пищевые продукты) были определены товары растительного происхождения:

Зерномучные товары – в производстве хлебобулочных и макаронных изделий для повышения пищевой и биологической ценности изделия;

Вкусовые товары – в изготовлении фиточая и алкогольных напитков (водки, бальзамы и горькие настойки) в целях улучшения вкусовых качеств, уменьшения количества дорогостоящих дефицитных ингредиентов, расширения ассортимента.

Кондитерские товары – в производстве мучных кондитерских изделий в виде песочно-отсадочного печенья для повышения их пищевой и биологической ценности, лечебно-профилактических свойств, а также фито-кисломолочного желеино пищевого продукта;

Из потребительских продовольственных товаров животного происхождения были отмечены:

– кисломолочные продукты – в производстве напитков для диетического и профилактического питания, а также лечебно-профилактического действия;

– мясные продукты – в изготовлении колбасных изделий и выработке копченой мясной продукции;

– рыбные продукты – в выпуске копченой рыбной продукции.

Из фармацевтических товаров выявлены лекарственные средства и парафармацевтическая продукция.

Лекарственные средства – в изготовлении лечебных препаратов и лечебно-профилактических средств для лечения сахарного диабета, заболеваний сердечно-сосудистой системы, гипертонической болезни, аритмии; для подавления негативного воздействия хронического СВЧ-излучения; для профилактики ревматизма и ревматических артритов, а также как составной компонент противолучевых средств и т.д.

Парафармацевтическая продукция – в производстве биологически активных препаратов, как правило, они предназначены для профилактики и (или) принимают их как вспомогательное биорегулирующее средство параллельно с традиционной терапией. Отмечены применение сырья растения рода боярышник в составе успокаивающий сборов в период повышенного эмоционального напряжения, фармакологических сборов в качестве иммуностимулирующих и общеукрепляющих средств, для очищения организма и в качестве антиоксиданта.

По остальным видам классификационных групп применение сырья растения боярышник не выявлено, в связи с этим они здесь не описаны.

Анализ обобщенных данных по патентным позволяет констатировать, что в Казахстане прежде всего из сырья растения рода боярышник (рис. 3) используется в фармацевтической и пищевой промышленности только плоды (40 разработок - 91%) и цветки (3 разработки – 7%) боярышника. При этом плоды боярышника применяются в цельном виде, а в виде порошка

не используется. Вместе с этим плоды боярышника применяют в фармацевтической и пищевой промышленности в виде жидкой настойки или экстракта, сухого концентрата настойки и сиропа. Кроме того, представленная информация указывает, что цветы и плоды боярышника совместно используют только в составе фито-чая (1 разработка – 2%) обладающего лечебно-профилактическим, тонизирующим и снимающим утомление действием.

Общая систематизация по торгово-товароведческой структуре (рис. 4) показало, что большую долю составляют фармацевтические товары – 52,27%, продовольственные товары животного происхождения – 13,64%, а товары растительного происхождения – 34,09%.

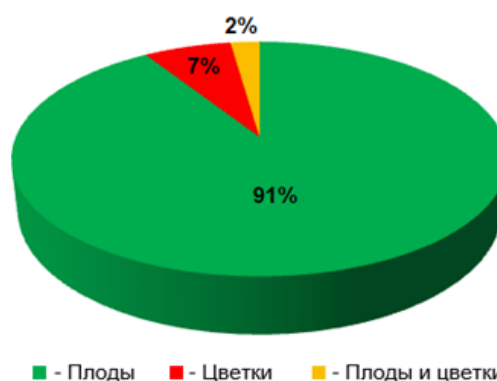


Рисунок 3 – Виды сырья растения рода боярышник используемые в производстве товаров

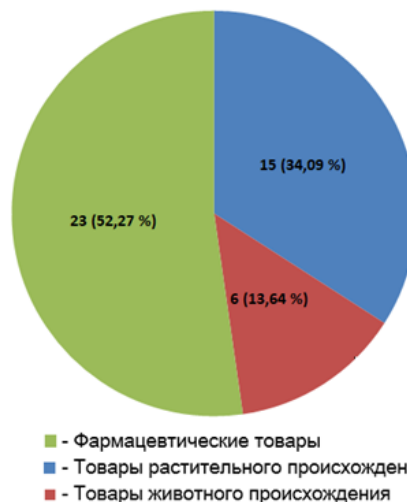


Рисунок 4 – Общая структура товаров, в которых используется сырьё растения рода боярышник

Анализ соотношения классификационных групп товаров, в производстве которых используется сырьё боярышника показан на рисунке 5.

В основной массе сырьё растения боярышник используют для изготовления лекарственных средств (38,64%), вкусовых товаров (25%) и парафармацевтической продукции (13,64%).

По объединенным классификационным группам продукции (рис. 5), нами установлены следующие группы:

– зерномучные товары – хлебобулочное изделие в

виде хлеба (Нур-Султан);

– вкусовые товары – алкогольные (Алматы, Павлодар, Тараз, Уральск, Усть-Каменогорск – по 1 патенту); фиточайные напитки (Алматы – 6 патентов);

– кондитерские товары – Нур-Султан, Алматы, Шымкент;

– кисломолочные продукты – Нур-Султан, Алматы, Омск (РФ);

– мясные продукты – Алматы, Шымкент;

– рыбные продукты – Алматы;

– лекарственные средства – Нур-Султан (2), Алматы (6), Караганда (6), Москва (РФ);

– парафармацевтическая продукция – Алматы,

Москва (РФ).

Пики патентной деятельности в области поиска наблюдаются в следующие годы (рис. 6): в 2002 году вручены 5 патентов; в 2011 году вручены 7 патентов; в 2015 году вручены 7 патентов. В остальные промежутки времени отмечается колебание показателя от 1 до 2 и от 1 до 3. Начиная с 2017 года, стабильно выдается по одному патенту в год. В 2020 году не было зарегистрированных патентов.

Анализ распределения выданных патентов по городам (рис. 7) показало, что больше всего патентообладателей приходится на город республиканского значения Алматы, их 18, что составляет 40,91%.



Рисунок 5 – Классификационные группы товаров, в производстве которых используется сырьё растения боярышник

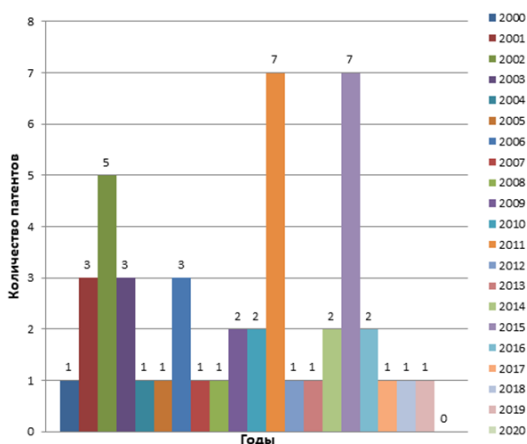


Рисунок 6 – Динамика выдачи патентной документации за 2000-2020 годы

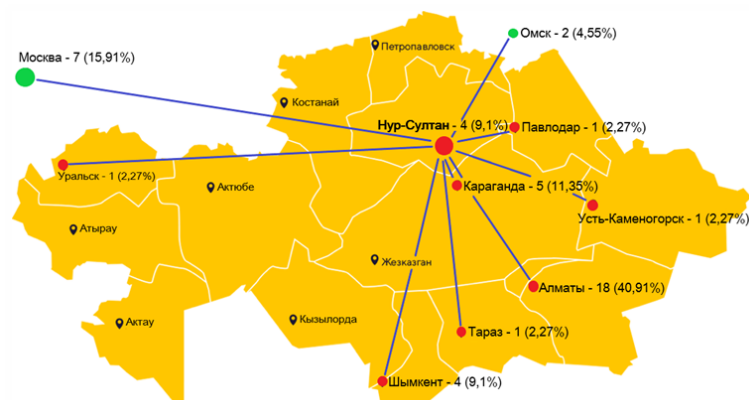


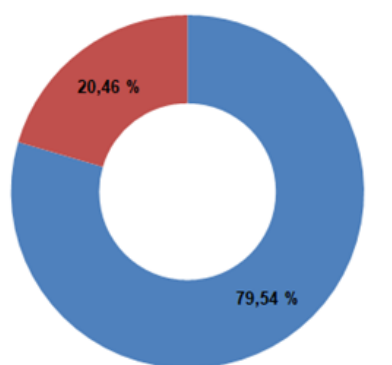
Рисунок 7 – Распределение выданных патентов на интеллектуальную собственность по местонахождению патентообладателя

Следующим городом является столица Российской Федерации – Москва, выдано 7 патентов, что составляет 15,91%. Городу Караганда принадлежит 5 патентов, т.е. 11,35% выданных патентных документов.

Далее идут два города: столица Республики Казахстан город Нур-Султан (4 патента) и город республиканского значения Шымкент (4 патента). По одному патенту зарегистрировано на города Омск (РФ), Усть-Каменогорск, Уральск, Тараз и Павлодар.

Соотношение национальных и иностранных (российских) патентообладателей соответственно составляет 79,54% и 20,46% (рис. 8).

Обработка и систематизация данных по категориям патентообладателей представлена на рисунке 9.



- - Национальные патентообладатели
- - Иностранные патентообладатели

Рисунок 8 – Соотношение национальных и иностранных патентообладателей

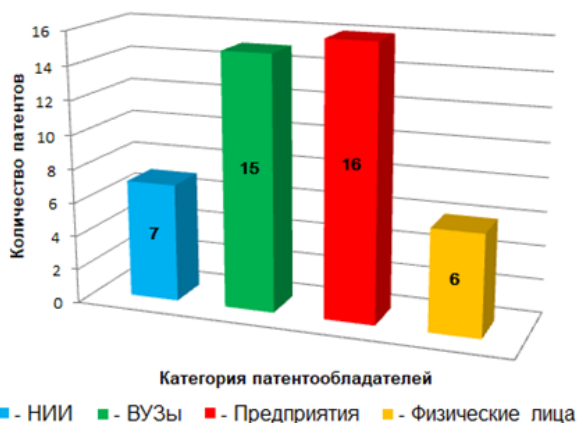


Рисунок 9 – Распределение патентной документации по категориям патентообладателей

Наиболее активны в разработке инновационной продукции производственные предприятия, на имя которых зарегистрировано 16 документов на интеллектуальную собственность. В их числе: 5 – на казахстанские предприятия по производству напитков в основном алкогольных, 2 – на предприятия по производству лекарственных средств и фитопродукции и одно на предприятие занятое оптовой торговлей широким ассортиментом товаров без какой-либо конкретизации. К ним также относятся 8 разработок таких российских фармацевтических компаний, как ООО

«ЛЕОВИТ нутри» и «ФАРМстарт». Далее по активности изысканий инновационной продукции представлены учреждения высшего образования – 15 разработок. Две разработки зарегистрированы Омским ГАУ (РФ), а остальные отечественными университетами, в их числе: КарГМА (3), КарГМУ (2), Юж-КазахстГУ имени М. Ауэзова (4), КазНМУ имени С.Д. Асфендиярова (2), Алматинский технологический университет (1) и КазНАУ (1). Семь разработок числятся за отечественными научно-исследовательскими организациями – Национальным центром биотехнологии (3), КазНИИ перерабатывающей и пищевой промышленности (2), КазНИИ переработки сельскохозяйственной продукции (1) и КазНИИ защиты и карантина растений имени Ж. Жиенбаева (1). Физическим лицам выдано 6 патентов, в виде единоличного авторства и коллектива авторов. Следует отметить отсутствие совместных работ между научными учреждениями и вузами в тесном сотрудничестве с производственными предприятиями. Безусловно, отсутствие такой кооперации отрицательно сказывается на отраслевых бизнес процессах, так как совместное разработка, патентование и использование технологического опыта и специальных знаний позволило бы сократить срок освоения изобретений, быстро наладить производство и сбыт новой продукции.

Заключение. Реализация выработанной стратегии поиска патентной документации позволила в казахстанской патентной базе выявить 44 документа об охране интеллектуальной собственности, при этом около 80% патентообладателей являются казахстанскими заявителями.

Установлены всего две отрасли использования сырья растения боярышник: фармацевтическая и пищевая. Показана возможность использования сырья боярышника при производстве фармацевтических товаров, продовольственных товаров животного происхождения и товаров растительного происхождения. При этом установлены классификационные группы товаров, в производстве которых используется сырьё боярышника: лекарственные средства, вкусовые товары (алкогольные), парафармацевтическая продукция, кондитерские товары, кисломолочные продукты, мясные продукты (колбасные изделия), копченые рыбные продукты и зерномучные товары (хлеб). Среди кондитерских изделий выявлено применение экстракта боярышника для изготовления железной продукции и песочно-отсадочного сдобного печенья.

Из сырья растения боярышник в основном используют целые плоды и в меньшей степени цветки растения боярышник. Их применяют в виде жидкой настойки или экстракта, сухого концентрата настойки и сиропа. Исключительную ценность для пищевой промышленности представляют плоды боярышника, что обусловлено уникально богатым его биохимическим составом. Использование порошка боярышника в производстве различной продукции не отмечено.

Изучение динамики патентования за анализируемый период свидетельствует, что на 2002, 2011 и 2015

годы приходится наиболее интенсивная деятельность. При этом преобладают национальные заявители, доля которых составляет около 60%, и они сосредоточены в городах-миллионниках: Алматы, Нур-Султан и Шымкент. Наблюдается коммерческий интерес на территории Казахстана со стороны российских фирм и предприятий, которым принадлежат 9 патентов, что способствует здоровой рыночной конкуренции.

Местонахождение патентообладателей свидетельствует о наличии сырья растения боярышник и географии их произрастания на территории Казахстана. К ареалам распространения боярышника в Казахстане можно отнести Алматинскую область и окрестности г. Алматы, Туркестанскую область и окрестности г. Шымкента, Карагандинскую, Акмолинскую, Жамбылскую, Павлодарскую, Восточно-Казахстанскую и Западно-Казахстанскую области.

Систематизация и анализ отобранной информации показали, что наиболее активны в разработке инновационной продукции с использованием сырья растения боярышник производственные предприятия и организации высшего образования. Однако, в данном направлении отсутствует кооперация науки, образования и производства.

Пищевая ценность плодов и наличие в них широкого спектра биологически активных веществ, а также уникальный химический состав, позволяют оценить боярышник как ценное, высокоперспективное сырьё для использования в целях пищевой промышленности. При наличии соответствующих технологий данное растительное сырьё можно использовать для повышения пищевой и биологической ценности изделий путем их обогащения и, тем самым, создавать и расширять ассортимент новых, сбалансированных по составу функциональных пищевых продуктов массового потребления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Герасименко, Н.Ф. Методологические аспекты полноценного, безопасного питания: значение в сохранении здоровья и работоспособности [Текст] / Н.Ф. Герасименко, В.М. Позняковский, Н.Г. Челнакова // Человек. Спорт. Медицина. – 2017. – Т. 17. – № 1. – С. 79-86.
- Веретнова, О.Ю. Возможности использования нетрадиционного растительного сырья в производстве пищевых продуктов функционального назначения [Текст] / О.Ю. Веретнова // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 6. – С. 154-158.
- Дубцова, Г.Н. Применение дикорастущих плодов в производстве мучных кондитерских изделий [Текст] / Г.Н. Дубцова, И.У. Кусова, Н.М. Дралина, Е.И. Сажина // Вопросы питания. – 2018. – Том 87. – № 5. – С. 210-211.
- Иванова, В.Н. Разработка комплексного рациона с применением пищевой смеси быстрого приготовления для целевой группы потребителей с предрасположенностью к сердечно-сосудистым и эндокринным заболеваниям [Текст] / В.Н. Иванова, И.А. Никитин, Н.М. Портнов, М.В. Клоконос, В.В. Фальков // Пищевая промышленность. – 2019. – №3. – С. 62-67.
- Ребезов, М.Б. Экология и питание. Проблемы и пути решения [Текст] / Ребезов, Н.Л. Наумова, Г.К. Альхамова, А.А. Лукин, М.Ф. Хайруллин // Фундаментальные исследования. – 2011. – №8, Ч.2. – С. 393-396.
- Исаева, А.Д. Стрессы и стрессовые состояния [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.polismed.com/articles-stressy-i-stressovye-sostojanija.html> (дата обращения 11.02.2021)
- Природные антиоксиданты - надежная защита человека от опасных болезней и старения [Текст] / Я. И. Яшин, В. Ю. Рыжнев, А. Я. Яшин, Н. И. Черноусова. – М.: ТрансЛит, 2009. – 122 с.
- Портнов, Н.М. Методология компьютерного проектирования персонализированных рационов питания [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.15. – М.: 2020. – 255 с.
- Иванова, В.Н. Проектирование персонализированных рационов с применением функциональных пищевых продуктов [Текст] / В.Н. Иванова, И.А. Никитин, Н.М. Портнов, Н.А. Жученко, С.В. Штерман, М.Ю. Сидоренко // Пищевая промышленность. – 2018. – № 11. – С. 10-16.
- Поверин, А.Д. Создание серии функциональных напитков из натурального растительного сырья [Текст] / А.Д. Поверин // Пиво и напитки. – 2006. – № 4. – С. 3-35.
- Потороко, И.Ю. Разработка технологии хлеба с лечебно-профилактическими свойствами на основе применения комплексной растительной добавки [Текст] / И.Ю. Потороко, А.В. Паймулина, Д.Г. Ускова // Вестник ЮУрГУ. – 2016. – №3. – С. 39-46.
- Табала, Е.Б. Обоснование использования дикорастущих ягод в производстве фруктово-ягодных кондитерских изделий [Текст] : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.18.15. [Место защиты: Сиб. ун-т потреб. кооп.] – Новосибирск, 2007. – 17 с.
- Изучение элементного состава плодов калины обыкновенной и рябины обыкновенной различными современными методами [Текст] / В. Ю. Андреева, Н. В. Исайкина, Т. Н. Цыбукова, Е. В. Петрова // Химия растительного сырья. – 2016. – № 1. – С. 177-180.
- Жилова, Р.М. Разработка технологии хлебобулочных и мучных кондитерских изделий профилактического назначения с использованием продуктов переработки дикорастущей ежевики [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.15. – М.: 2006. – 24 с.
- Поткина, Г.Г. Пектиновые вещества плодово-ягодных культур [Текст] / Г.Г. Поткина, Н.В. Ляшевская, О.В. Кузнецова // Материалы II межрегиональной научно-практической конференции «Биоразнообразие, проблемы экологии Горного Алтая и сопредельных территорий: настоящее, прошлое, будущее». – Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2016. – С. 123-126.
- Магомедов, М.Г. Научно-практическое обеспечение производства пищекопцентратов из фруктово-овощного сырья и пищевых продуктов функционального назначения на их основе [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.01. – Воронеж, 2016. – 411 с.
- Алексеева, Н.А. Состояние и направления развития предприятий хлебопекарной промышленности в России [Текст] / Н.А. Алексеева // Наука и образование: новое время. – 2016. – №4. – С. 4-7.
- Лосева, И.В. Сырьевая база лекарственных растений Казахстана и ее рациональное использование: учебно-методическое пособие [Текст] / И.В. Лосева. – Караганда. – 2008. – 110 с.
- Атлас ареалов и ресурсов лекарственных растений Казахстана [Текст] / Нац. АН Респ. Казахстан. Ин-т ботаники; [Сост. Ю. В. Аверина и др.]; Под науч. ред. М. И. Кукенова. – Алматы : Гылым, 1994. – 165 с.
- Никиточкина, Т.Д. Лекарственные растения леса [Текст] / Т.Д. Никиточкина. – М.: Изобразительное искусство, 1991. – 34 с.
- Заботина, Н. Боярышник, исцеляющее сердце [Текст] / Н.Заботина. – СПб.: Издательство «Ареал Принт», 2005. – 128 с.
- Рощин, И. Лечение боярышником [Текст] / И.Рощин. – Воронеж: Изд-во «Научная книга», 2013. – 80 с.
- Ковини, Д. Гурманстика. Культура еды и еда как культура [Текст]: пер. с англ. / Д. Ковини, О. В. Гритчина. – Харьков: Изд-во «Гуманитарный центр», 2016. – 136 с.
- Меличани, Ф. Наука на кухне [Текст] / Ф. Меличани. – М.: Дискурс, 2020. – 304 с.
- Товароведение, экспертиза и стандартизация : учебник [Текст] / А. А. Ляшко, А. П. Ходыкин, Н. И. Волошко, А. П. Снитко. – 3-е изд., стер. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К^о», 2020. – 666 с.

Статья поступила в редакцию 29.09.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 664

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0030

ПОТЕНЦИАЛ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ РЕЧНЫХ РАКОВ КАК СЫРЬЯ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СОУСОВ

© 2021

Муханова Мария Александровна, соискатель

Якубова Олеся Сергеевна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Технология товаров и товароведение»

Астраханский государственный технический университет

(414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mails: m.a.muxanova@mail.ru, o.c.iakubova@mail.ru)

Аннотация. В работе исследованы зарубежные подходы к технологии приготовления соусов с использованием панцирсодержащего сырья ракообразных. Исследовано панцирсодержащее сырье речных раков Астраханской области. Проведены исследования массового и химического состава панцирсодержащего сырья рака. Установлено, что общий выход панцирсодержащего сырья рака находится на уровне 75%, выход мышечной ткани (мяса шейки рака) составляет 9,6%. Установлено достаточно близкие значения по химическому составу карапакса и панциря шейки. Содержание белка в исследованном панцирсодержащем сырье составляет 7,8-9,1%. Также для карапакса и панциря шейки раков отмечают высокое содержание минеральных веществ 12,7-13,8%, содержание жира не более 1%. Разработана технология соуса с использованием панцирсодержащего сырья рака, в частности использовали (карапакс и панцирь шейки). Представлена органолептическая характеристика соуса на основе вторичных водных биоресурсов. В результате исследования получали соус с высокими органолептическими показателями: насыщенным, гармоничным вкусом, со сложным продолжительным приятным послевкусием рыбного характера и вносимых морепродуктов, овощей, в меру соленый, без посторонних привкусов. Однородной, густой, вязкой консистенции. Яркого, однородного по всей массе цвета, от светло-желтого до оранжевого. Приятного запаха с нотами термически обработанного рыбного сырья, морепродуктов и овощей. Разработанный соус может использоваться самостоятельно или быть основой для приготовления производных соусов, для этого добавляются различные ингредиенты и пряности в зависимости от назначения соуса.

Ключевые слова: раки, панцирсодержащее сырье, соус, водные биоресурсы, качество, технология.

SECONDARY RESOURCES POTENTIAL OF RIVER CRANKS AS RAW MATERIALS FOR MAKING SAUCE

© 2021

Mukhanova Maria Alexandrovna, applicant

Yakubova Olesya Sergeevna, candidate of technical sciences,

associate professor of the department "Technology of goods and commodity science"

Astrakhan State Technical University

(414056, Astrakhan, Tatishcheva st., 16, e-mails: m.a.muxanova@mail.ru, o.c.iakubova@mail.ru)

Abstract. The work investigates foreign approaches to the technology of making sauces using shell-containing crustacean raw materials. The carapace-containing raw materials of the crayfish of the Astrakhan region were investigated. Investigations of the mass and chemical composition of carapace-containing raw materials of cancer have been carried out. It was found that the total yield of carapace-containing raw materials of cancer is at the level of 75%, the yield of muscle tissue (meat of the neck of cancer) is 9.6%. Quite similar values have been established for the chemical composition of the carapace and the carapace of the neck. The protein content in the studied carapace-containing raw material is 7.8-9.1%. Also, for carapace and crayfish neck carapace, a high content of minerals of 12.7-13.8% is noted, the fat content is not more than 1%. A sauce technology has been developed with the use of carapace-containing raw materials of cancer, in particular, they used (carapace and carapace of the neck). The organoleptic characteristics of the sauce based on secondary aquatic biological resources are presented. As a result of the study, a sauce with high organoleptic characteristics was obtained: a rich, harmonious taste, with a complex long-lasting pleasant aftertaste of a fishy character and introduced seafood, vegetables, moderately salty, without extraneous aftertastes. Homogeneous, thick, viscous consistency. Bright, uniform color throughout the mass, from light yellow to orange. Pleasant smell with notes of heat-treated raw fish, seafood and vegetables. The developed sauce can be used independently or be the basis for the preparation of derivative sauces, for this, various ingredients and spices are added, depending on the purpose of the sauce.

Keywords: crayfish, shell-containing raw materials, sauce, aquatic biological resources, quality, technology.

Введение. По данным Волго-Каспийского территориального управления Федерального агентства по рыболовству объемы производства речных раков в водных объектах Астраханской области составили в 2019 и 2020 г по 4 тонны [12]. Речные реки можно рас-

сматривать как стабильной объект для переработки. Причем учитывая высокие вкусоароматические качества наиболее перспективно использование раков в ресторанных технологиях, в том числе за счет высокой ценности и востребованности данного сырья. Однако,

мышечная ткань составляет не более 30% от массы целого рака. В отходы поступает карапакс, панцирь шейки, ножки, клешни и головогрудь общий выход панцирсодержащего сырья может составлять до 75% [14]. Учитывая высокую пищевую ценность и стоимость данного ресурса, особенно актуально осуществлять комплексную и полную переработку речных раков. В связи с этим, переработка панцирсодержащего сырья раков для производства соусов наиболее актуальна.

Целью статьи является исследование технологического потенциала вторичных ресурсов речного рака, как сырья для получения соусной продукции.

Материалы и результаты исследования. Известно, что панцирь ракообразных является внешним скелетом. Основные элементы данного скелета: хитин, играющий роль каркаса, минеральная часть (карбонат кальция), придающий панцирю необходимую прочность, и белки в виде хитин-белкового комплекса, придающие ему свойства живой ткани [14, 20].

Известны данные о возможности переработки панцирсодержащего сырья раков, а также камчатского краба для получения биологически активных веществ [13-15, 20]. При существующих технологиях переработки ракообразных на пищевую продукцию остаётся нерешённым вопрос об использовании отходов на предприятиях общественного питания, которые являются одними из основных аккумуляторов вторичных ресурсов речных раков в Астраханской области. Без разработки рациональных технологий применимых на предприятиях общественного питания перерабатывать большое количество ценного вторичного сырья практически невозможно, а образующиеся неперерабатываемые отходы согласно Техническому регламенту по безопасности пищевой продукции ТР ТС 021/2011, должны быть собраны и утилизированы. Одним из решений данной проблемы является использование панцирсодержащего сырья в технологиях приготовления соусной продукции.

Для производства соусов привлекательно содержание вкусоароматических веществ в панцирсодержащем сырье. Основные направления исследований в части переработки панцирсодержащего сырья ракообразных, используемые в настоящей работе, основываются на зарубежных подходах к производству изысканных блюд. Обращает на себя особое внимание соус «Биск», в частности подходы к технологии его производства. На основе последовательности технологических приемов его приготовления возможна разработка технологии соуса, который может использоваться для горячих блюд из рыбы и морепродуктов. Соус или суп «Биск» является результатом безотходного использования сырья для производства французских блюд.

Рецептура классического соуса «Биск» включает в себя следующие компоненты: панцири ракообразных, томаты, консервированные в собственном соку, лук, морковь, сельдерей; коньяк или бренди; оливковое масло, сливки, специи. Технология приготовления данного соуса заключается в проваривании основных

компонентов. Пустые панцири ракообразных промывают, просушивают, измельчают. После первичной обработки овощей (морковь, лук, сельдерей) измельчают, проваривают или пассеруют. Далее соединяют с панцирями ракообразных и проваривают 2-3 минуты. Далее добавляют алкоголь и дают спирту испариться. В получившуюся смесь добавляют томаты, воду, варят в течение 40-50 минут. Получившуюся смесь измельчают с использованием блендера, затем протирают через мелкое сито. Массу охлаждают, перед подачей в готовый соус возможно добавление сливок и специй [1].

Учитывая зарубежные подходы разрабатывали технологию соуса на основе панцирсодержащего сырья раков и вторичных рыбных ресурсов. Первично исследование состав и характеристики панцирсодержащего сырья раков Астраханской области.

Методы используемые в исследовании, являлись стандартными, общепринятыми и специальными. Определение показателей химического состава (белки, жиры, углеводы) осуществляли экспериментально с учётом требований ГОСТ Р 54607.1-2011, ГОСТ Р 54607.2-2012, 54607.3-2014, ГОСТ Р 54607.4-2015, ГОСТ 54607.5-2015, ГОСТ 54607.7-2016, ГОСТ Р 54607.10-2017 [4-11]. Разработку технологии нового блюда проводили по ГОСТ 32691-2014, органолептическую оценку по ГОСТ 31986-2012 [2, 3].

Панцирсодержащими отходами речного рака являются головогрудь, карапакс, панцирь брюшной части, ходильные конечности. Литературные размерные данные, характерные для речных раков, представлены в таблице 1 [14,20].

Таблица 1 – Размерные характеристики речных раков

Наименование	Длина, см	Масса, г
Мелкие	9-10	20-30
	11-13	25-40
Средние	10,1-12	30-40
	13-15	40-65
Крупные	12,1-14	40-60
	15-16	65-105
Отборные	14	60-80
	16-17	Более 105

В рамках данной работы использовали крупных раков, длиной 15-16 см, масса (одного рака) 80 -100 г. Отварных раков разделявали и определяли выход частей. Результаты исследований в части выхода частей тела вареных раков показаны на рисунке 1. Экспериментальные данные сравнивали с известными количественными характеристиками раков для данной группы [14, 20].

Результаты проведенных исследований массового выхода частей речного рака показали, выход панцирсодержащего сырья на уровне 75%, выход мышечной ткани (мяса шейки рака) составляет 9,6%. Полученные экспериментальные данные подтверждают известные данные [14].

С практической точки зрения, на предприятиях индустрии питания в качестве вторичных ресурсов целесообразно использовать карапакс и панцирь шейки, что обусловлено значительной долей данных частей в

отходах предприятий индустрии питания после разделки рака, а также возможностью их сборки и холодильного хранения. Массовая доля карапакса и панциря рака составила 18% от массы целого рака.

Далее проводили сравнительное исследование химического состава карапакса и панциря шейки. Химический состав панцирсодержащего сырья раков представлен на рисунке 2 и 3.

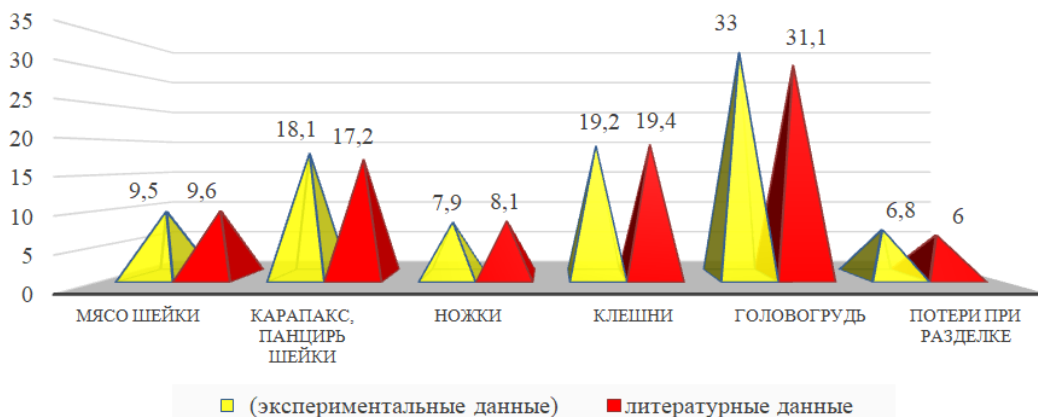


Рисунок 1 – Выход частей тела вареных речных раков, %

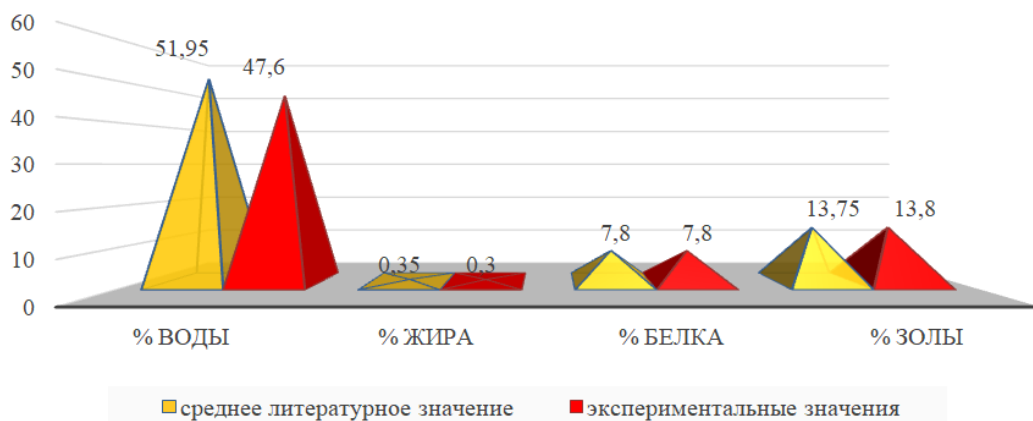


Рисунок 2 – Химический состав панцирсодержащего сырья раков (панцирь шейки)

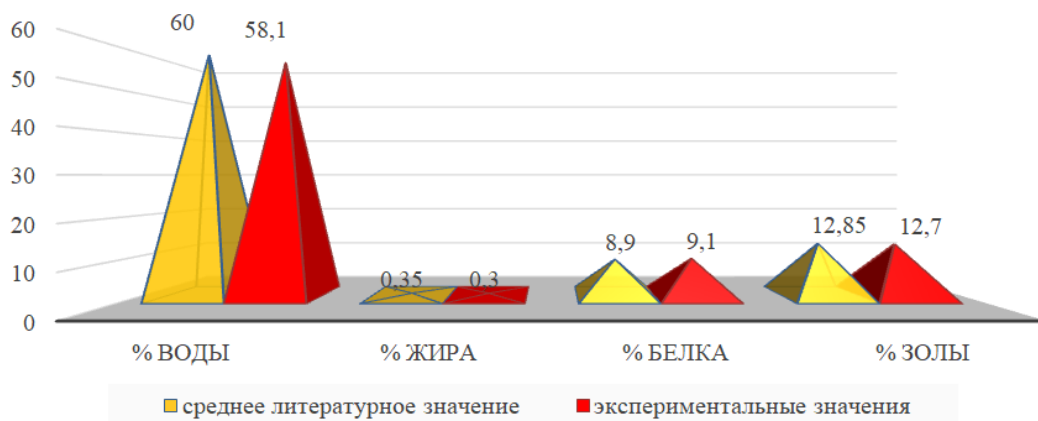


Рисунок 3 – Химический состав панцирсодержащего сырья раков (карапакс)

Установлено достаточно близкие значения по химическому составу карапакса и панциря шейки. Содержание белка в исследованном панцирсодержащем сырье составляет 7,8-9,1%. Также для карапакса и панциря шейки раков отмечают высокое содержание минеральных веществ 12,7-13,8%, содержание жира не более 1%. Результаты проведенных исследований подтверждают известные научные данные, представленные в работах под руководством профессора Му-

катовой М.Д., по массовому выходу и химическому составу речного рака [14].

Данные химического состава свидетельствуют о том, что панцирсодержащие части после разделения раков содержат до 9,1% белка до 13,8% минеральных веществ. Таким образом установлено, что помимо вкусоароматической составляющей панциря рака, этот вторичный ресурс включает определенную пищевую ценность и может обогатить соусную про-

дукцию белком и минеральными веществами. Следовательно их целесообразно направлять на переработку, чтобы исключить потерю ценного белка.

Далее была разработана технология соуса из вторичных водных биоресурсов, включающая в себя следующие этапы: при использовании свежего растительного сырья – операция сортировки, обработки и промывания растительного сырья (морковь, лук репчатый, сельдерей); при использовании рыбных отходов – операция промывание, просушивание, измельчение (кости рыбные, чешуя рыбная, панцирсодержащее сырье раков); измельченные и подготовленные рыбные кости, панцирсодержащее сырье, чешую рыб запекают в духовом шкафу при температуре (180-200°С) в течение 30-40 минут; затем варят при температуре (90-95°С) в течение 3-4 часов в пищеварочном котле, в конце варки добавляют пряности; отделяют жидкую белковую фракцию, фильтруют и охлаждают до температуры 4-6°С, снимают с поверхности жир; морковь, лук и сельдерей запекают при температуре (180-200°С) 20-25 минут, охлаждают, измельчают до состояния пасты; готовую овощную смесь соединяют с жидкой белковой фракцией, нагревают до температуры (90-95°С) и варят в течение 15-20 минут, охлаждают до температуры 50-60°С. Массу измельчают блендером до однородной массы, затем протирают через мелкое сито; добавляют соль и крахмал амилацетат АМ-1 или гуаровую камедь и тщательно перемешивают, и готовят в течение 5 минут при температуре (85-95°С); охлаждают; расфасовывают в емкости. Представленная рецептура и технология усовершенствована, проведены исследования по модификации рецептуры, за счет дополнительного применения биотехнологических процессов. После операции варки добавлена операция охлаждения массы до температуры 40-45°С и ферментализ при температуре 42-43°С в течении 2 часов. Затем нагревание до температуры 90°С и варка в течении 1 часа при перемешивании, для инактивации ферментов и выделения в раствор дополнительных питательных веществ. Далее технологические операции аналогичные процессу приготовления соуса указанному ранее [16, 17].

Далее проводили исследования по описанию органолептических показателей качества с использованием современных методик [18, 19].

Разработанный соус имеет следующие органолептические показатели качества, соответствующие пяти баллам: внешний вид (однородная густая масса, без отслоения жидкости, без комков заварившегося крахмала, без пленок и выступившего жира на поверхности. Комочки и посторонние включения отсутствуют); цвет (яркий, однородный по всей массе, от светло-желтого до оранжевого (янтарный), с оттенками вкраплений морепродуктов и/или рыбных и/или овощных компонентов); запах (интенсивный, приятный, гармоничный, с нотами термически обработанного рыбного сырья, морепродуктов, овощей и пряностей, без посторонних тонов, свойственный рецептурным компонентам); текстура (однородная,

густая, вязкая), вкус и послевкусие (насыщенный, гармоничный, со сложным продолжительным приятным послевкусием рыбного характера и вносимых морепродуктов, овощей и пряностей, в меру соленый, без посторонних привкусов).

В результате исследования получали соус с высокими органолептическими показателями: насыщенным, гармоничным вкусом, со сложным продолжительным приятным послевкусием рыбного характера и вносимых морепродуктов, овощей, в меру соленый, без посторонних привкусов. Однородной, густой, вязкой консистенции. Яркого, однородного по всей массе цвета, от светло-желтого до оранжевого. Приятного запаха с нотами термически обработанного рыбного сырья, морепродуктов и овощей. Разработанный соус может использоваться самостоятельно или быть основой для приготовления производных соусов, для этого добавляются различные ингредиенты и пряности в зависимости от назначения соуса.

Оригинальные сенсорные характеристики разработанной соусной продукции могут быть обусловлены химическим составом исходного сырья. Установлено, что коллагенсодержащее сырье (рыбная чешуя и кости) имеет в своем составе высокое содержание глутаминовой и аспарагиновой кислот, которые являются предшественниками образования вкусовых веществ. Ферментализ сырья приводит к образованию свободных аминокислот и пептидов, это приводит к формированию насыщенного натурального вкуса и приятного запаха рыбных соусов. Также обогащает и гармонизирует вкус и запах соусов на основе рыбного коллагенсодержащего сырья добавление предварительно обработанного панцирсодержащего сырья раков, за счет этого появляется послевкусие и нота морепродуктов.

Заключение. Таким образом, в работе проанализированы зарубежные подходы к технологии приготовления соусов с использованием панцирсодержащего сырья ракообразных. Исследовано панцирсодержащее сырье речных раков Астраханской области, показан потенциал из использования для приготовления соусов. Разработана технология соуса с использованием панцирсодержащего сырья рака, в частности использовали (карапакс и панцирь шейки). Представлена органолептическая характеристика соуса на основе вторичных водных биоресурсов. Разработанный соус может использоваться самостоятельно или быть основой для приготовления производных соусов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Брунер, М. Соусы [Текст] / М. Брунер, М. Хаумйаер, К. Ланге, Ф. Ланге, И. Шиндлер, К. Виттман // М: TEUBNER. – 2008. – 420 с.
2. ГОСТ 31986-2012 Услуги общественного питания. Метод органолептической оценки качества продукции общественного питания [Текст]. – Введ.01.01.2015. – М.: Стандартинформ, 2014. – 15 с.
3. ГОСТ 32691-2014 Услуги общественного питания. Порядок разработки фирменных и новых блюд и изделий на предприятиях общественного питания [Текст]. – Введ. 01.01.2016. – М.: Стандартинформ, 2015. – 15 с.
4. ГОСТ Р 54607.1-2011 Услуги общественного питания. Методы лабораторного контроля продукции общественного

питания. Часть 1. Отбор проб и подготовка к физико-химическим испытаниям [Текст]. – Введ. 01.01.2013. – М.: Стандартинформ, 2012.-15 с.

5. ГОСТ Р 54607.2-2012 Услуги общественного питания. Методы лабораторного контроля продукции общественного питания. Часть 2. Методы физико-химических испытаний [Текст]. – Введ. 01.01.2014. – М.: Стандартинформ, 2014.-35 с.

6. ГОСТ Р 54607.3-2014 Услуги общественного питания. Методы лабораторного контроля продукции общественного питания. Часть 3. Методы контроля соблюдения процессов изготовления продукции общественного питания [Текст]. – Введ. 01.01.2016. – М.: Стандартинформ, 2015.-19 с.

7. ГОСТ Р 54607.4-2015 Услуги общественного питания. Методы лабораторного контроля продукции общественного питания. Часть 4. Методы определения влаги и сухих веществ [Текст]. – Введ. 01.01.2016. – М.: Стандартинформ, 2016.-11 с.

8. ГОСТ Р 54607.5-2015 Услуги общественного питания. Методы лабораторного контроля продукции общественного питания. Часть 5. Методы определения жира [Текст]. – Введ. 01.06.2016. – М.: Стандартинформ, 2016. – 15 с.

9. ГОСТ Р 54607.7-2016 Услуги общественного питания. Методы лабораторного контроля продукции общественного питания. Часть 7. Определение белка методом Кьельдаля [Текст]. – Введ. 01.01.2017. – М.: Стандартинформ, 2016. – 11 с.

10. ГОСТ Р 54607.10-2017 Услуги общественного питания. Методы лабораторного контроля продукции общественного питания. Часть 10. Определение массовой доли общей зольности [Текст]. – Введ. 01.10.2017. – М.: Стандартинформ, 2017. – 10 с.

11. ГОСТ ISO 5492-2014 Органолептический анализ. Словарь [Текст]. – Введ.01.01.2016. – М.: Стандартинформ, 2015. – 51 с.

12. Итоги деятельности федерального агентства по рыболовству в 2020 году и задачи на 2021 год // Федеральное агентство по рыболовству: материалы к заседанию апрель 2021 г. – https://fish.gov.ru/wpcontent/uploads/documents/ob_agentstve/kollegiya/itogi_2021.pdf (дата обращения 20.09.2021).

13. Максимова С.Н., Полешук Д.В., Суровцева Е.В., Верещагина К.К., Милованов А.В. Потенциал вторичных ресурсов камчатского краба как технологически ценного сырья // Индустрия питания Food Industry. 2019. Т. 4, № 4. С. 30–36. DOI 10.29141/2500-1922-2019-4-4-4

14. Мукатова, М.Д. Инновационные технологии комплексной обработки нерыбных биоресурсов Волжско-Каспийского бассейна: монография / М.Д. Мукатова, Р.Р. Утеушев, А.В. Привезенцев, А.Р. Аппазова, Н.А. Киричко, М.С. Моисеенко; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. М.Д. Мукатовой; Астрахан. гос. техн. ун-т. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2018. – 192 с. ISBN 978-5-89154-647-9.

15. Биостимулятор на основе низкомолекулярного хитозана из панциря раков для предпосевной обработки семян томатов / Ш. Б. Байрамбеков, Е. В. Полякова, М. Д. Мукатова, Н. А. Киричко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2012. – № 1. – С. 181-184.

16. Муханова, М.А. Разработка рыбного обогащённого соуса / М.А. Муханова, Н.Р. Айзатулина, О.С. Якубова // Наука и творчество: вклад молодежи. Сборник материалов всероссийской молодежной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Махачкала. – 2020. – С. 148-151.

17. Пат. № 2711812 С1 Российская Федерация, МПК А23L 27/22, А23J 3/04, А23L 23/00. Соус с высоким содержанием белка : № 2018142463 : заявл. 30.11.2018 : опубл. 22.01.2020 / О.С. Якубова, М. А. Муханова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Астраханский государственный технический университет", ФГБОУ ВО "АГТУ" (RU). – 9 с.

18. Родина, Т.Г. Сенсорный анализ продовольственных товаров [Текст] / Т.Г. Родина.– М.: Академия, 2004. – 208 с.

19. Позняковский, В. М. Сенсорный анализ продовольственных товаров в на предприятиях пищевой промышленности, торговли и общественного питания : Учебник / В. М. Позняковский, О. В. Голуб, Н. В. Заворохина. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2016. – 144 с. – (Бакалавриат). – ISBN 978-5-16-011493-4.

20. Утеушев, Р.Р. Разработка технологии комплексной переработки панцирьсодержащего сырья из ракообразных Волго-каспийского региона [Текст] / Р.Р. Утеушев // Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. М.: Астраханский государственный технический университет. – 2006. – 28 с.

Статья публикуется при поддержке гранта Фонда содействия инновациям по договору 16281ГУ/2021 от 18.05.2021 (УМНИК-206, Астраханская область 2020).

Статья поступила в редакцию 01.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 664.1/.2(045)

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0031

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕЛАНИНА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОСТАВЕ КАКАОСОДЕРЖАЩИХ КОНДИТЕРСКИХ ГЛАЗУРЕЙ

© 2021

Кадрицкая Елена Александровна, аспирант кафедры Технологии питания
Школьникова Марина Николаевна, доктор технических наук, профессор кафедры Технологии питания
Уральский государственный экономический университет
(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: shkolnikova.m.n@mail.ru)

Аннотация. Изделия в шоколадной глазури занимают особое место среди кондитерских товаров благодаря ее высоким вкусовым достоинствам и способности сохранять свежесть изделий более длительное время. В последнее время интерес производителей кондитерских изделий направлен на повышение пищевой ценности как готовых изделий, так и полуфабрикатов – кондитерских масс, глазури и т.д., за счет обогащения растительными белками, пищевыми волокнами, использования продуктов переработки плодов и овощей. В связи с этим, в качестве альтернативных заменителей какао-продуктов необходимо исследование нетрадиционных ингредиентов, в том числе местных и полученных из вторичных сырьевых ресурсов, в частности меланина, выделенного из лузги гречихи посевной. В статье приведены данные по исследованию качества и технологических свойств меланина. Показано, что образец меланина в виде порошка по внешнему виду и дисперсности похож на какао-порошок и может частично заменить его в составе кондитерской глазури, обладая приемлемыми значениями активной кислотности, влаго- и жиродерживающей способностью.

Ключевые слова: меланин, растворимость, влаго-жиродерживающая способность, какаосодержащая глазурь.

INVESTIGATION OF THE TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF MELANIN FOR USE IN THE COMPOSITION OF COCOA-CONTAINING CONFECTIONERY GLAZES

© 2021

Kadritskaya Elena Alexandrovna, postgraduate student of the Department of Nutrition Technology
Shkolnikova Marina Nikolaevna, doctor of technical Sciences, professor of the Department of Nutrition Technology
Ural State University of Economics

(620144, Russia, Yekaterinburg, 8 Marta street/Narodnaya Volya, 62/45, e-mail: shkolnikova.m.n@mail.ru)

Abstract. Products in chocolate glaze occupy a special place among confectionery products due to its high taste advantages and the ability to preserve the freshness of products for a longer time. Recently, the interest of confectionery manufacturers has been directed at increasing the nutritional value of both finished products and semi-finished products – confectionery masses, glazes, etc., due to enrichment with vegetable proteins, dietary fibers, the use of fruit and vegetable processing products. In this regard, as alternative substitutes for cocoa products, it is necessary to study non-traditional ingredients, including local and obtained from secondary raw materials, in particular melanin isolated from the husk of buckwheat. The article presents data on the study of the quality and technological properties of melanin. It is shown that a sample of melanin in the form of a powder is similar in appearance and dispersion to cocoa powder and can partially replace it in the composition of confectionery glaze, having.

Keywords: melanin, solubility, moisture-fat-retaining ability, cocoa-containing glaze.

Введение. На сегодняшний день природные меланины находят все большее применение в пищевой промышленности, благодаря таким свойствам, как: защита от света, хелатирование ионов металлов, антибактериальная и антиоксидантная активность (АОА).

В работе [1] приведены экспериментальные данные по выделению и изучению меланина из граммотрицательной морской бактерии *Vibrio alginolyticus*. Доказано отсутствие цитотоксичности у образца меланина. Приведены результаты, убедительно доказывающие фотозащитную способность меланина. В эксперименте установлено, что образец меланина менее цитотоксичен, чем образцы продуцируемые *Escherichia coli* или выделенные из растительного сырья. По мнению авторов, это может быть связано с его цитопротекторными свойствами, например, очистка от радикалов и хелатный потенциал. Также выделенный пигмент обладает высокой биоактивностью в отношении пище-

вых патогенов и может быть использован в пищевой промышленности.

В патенте 2215761 описан способ получения пигмента-красителя меланина из лузги гречихи с получением красителя в количестве 10,0–10,6%. Авторы доказали, что выход пигмента меланина значительно выше при проведении предварительной обработки лузги. По мнению авторов, пигмент можно использовать как пищевой краситель, а также как лекарственный препарат в медицине, фармакологии и других отраслях [2].

Ранее авторы в проведенных исследованиях показали возможность получения пищевого красителя меланина из лузги гречихи с экспериментальным подтверждением сорбционной и АОА, что хорошо согласуется с литературными данными. Так в работе Грачевой Н. В. И Желтобрюхова В.Ф. приведены данные по высокой АОА меланина из лузги подсолнечника [3, 4].

Известно использование меланина в кондитерских изделиях. Так, пищевой пигмент-краситель был использован в креме из ягод жимолости в количестве 1,5 г на порцию готового десерта, что обеспечивает функциональность продукта и высокие органолептические характеристики. Также крем с испытуемым пищевым пигментом-красителем по сравнению с контрольным образцом (кремом без добавления пищевого пигмента-красителя) имел повышенную АОА ($0,15 \pm 0,01$ против $0,13 \pm 0,01$ мг кверцетина/г образца) и большее содержание клетчатки ($0,565 \pm 0,01$ против $0,025 \pm 0,01$ мг %). По утверждению авторов, добавление пищевого пигмента-красителя не только повышает АОА в десерте, но и обогащает его состав клетчаткой [5].

В патенте РФ 2545349 раскрыт способ получения из шелухи гречихи природного красителя на основе пигмента меланина в качестве альтернативы какао-порошку при производстве кондитерских изделий. По мнению авторов, полученный пигмент может быть использован в качестве замены порошка какао в кондитерских отделочных полуфабрикатах при изготовлении мучных кондитерских изделий [6].

Изделиям в какаосодержащей глазури присущи высокие вкусовые достоинства, что обуславливает их популярность в сегменте глазированных продуктов питания. В свете актуальных трендов здорового питания изготовители кондитерских изделий стараются, с одной стороны, снизить содержание сахара в рецептурах, а с другой – повысить пищевую ценность как готовых изделий, так и полуфабрикатов для их производства – кондитерских масс, глазурей и т.д. за счет использования продуктов переработки плодов и овощей [7, 8].

Надо сказать, что исследования по поиску альтернатив / эквивалентов / заменителей какао-порошку активно проводятся лишь в последние несколько лет. Исследования по использованию нетрадиционных сырьевых ингредиентов в рецептурах кондитерской глазури обусловлены рядом причин, основная из которых постоянно растущие стоимость какао-бобов и спрос на них при практически неизменном объеме производства какао-продуктов, нестабильная ситуация на рынке, которая, по мнению экспертов, может выйти из-под контроля. Как сообщило агентство *Bloomberg*, по оценке крупнейших производителей шоколада – компаний *Mars* и *Barry Callebaut* – к 2030 г спрос на какао будет превышать его производство до 2 млн. т. В связи с чем, в качестве альтернативных заменителей какао-продуктов возможно и необходимо использование нетрадиционных ингредиентов, в том числе местных и полученных из вторичных сырьевых ресурсов, опыт использования которых показан в работах [9–11], для снижения содержания какао в кондитерских полуфабрикатах и изделиях.

Наиболее близкой альтернативой порошку, полученному из какао-бобов, является порошок из их оболочки – какаоеллы, которая долгое время являлась отходом переработки какао-бобов в виду ее твердости, микробиологической загрязненности и содержания ряда токсичных элементов, в частности афлатоксинов,

пестицидов, солей тяжелых металлов и др.). В работе Магомедова Г.О. и соавторов показана принципиальную возможность использования какаоеллы в технологии кондитерских полуфабрикатов при повышении микробиологической чистоты порошков какаоеллы методом обеззараживания энергией электромагнитного поля сверхвысокой частоты [12].

В технологии кондитерских изделий находит применение кэрб, представляющий собой порошкообразный продукт, полученный из высушенных бобов рожкового дерева. Авторами показано, что кэрб может быть использован в качестве потенциального заменителя какао-порошка, благодаря его высокой пищевой ценности и высоким сенсорным свойствам, в том числе в процессе хранения [13–15].

В работе Линовской Н.В. и соавторов показана возможность использования фруктово-овощных порошков в составе шоколадных глазурей, так как ГОСТ Р 53897-2010 Глазурь. Общие технические условия, предоставляет возможность производства шоколадной глазури с фруктовыми и овощными компонентами [8].

В исследованиях О. Gorodyska и соавторов показана возможность использования в качестве альтернативы какао-порошку порошок виноградных косточек [16].

Таким образом, альтернативам полученного из бобов какао порошка в составе кондитерских глазурей могут быть порошки, полученные из оболочек бобов – какаоеллы, из плодов рожкового дерева – кэрб, и плодоовощные. Полученные данные показывают принципиальную возможность использования меланина из лузги гречихи посевной в рецептурах кондитерских глазурей, что обусловило актуальность и **цель** настоящего исследования – оценка качества и технологических свойств меланина, выделенного из лузги гречихи посевной.

Материалы и результаты исследований. Объектами исследования являлись образцы меланина: экспериментальный, полученный по описанному в [3] методу (опытный), коммерческий торговой марки «Русские корни» (контроль) и какао-порошка производственного (контроль).

Идентификацию пигмента меланина проводили известными качественными реакциями: по изменению цвета водных растворов меланина и выпадению характерных осадков при добавлении пероксида водорода (H_2O_2), окислителя перманганата калия ($KMnO_4$) и хлорида железа ($FeCl_3$) и методом тонкослойной хроматографии по [17].

Органолептические показатели образцов определены стандартными методами по ГОСТ 5897-90. Изделия кондитерские. Методы определения органолептических показателей качества, размеров, массы нетто и составных частей при температуре $(18 \pm 3)^\circ C$. Для определения вкуса получали водный настой с соотношением 1:20.

Физико-химические показатели определены стандартными методами: содержание влаги – по ГОСТ 5900-2014 Изделия кондитерские. Методы определения влаги и сухих веществ; содержание золы общей и

не растворимой в растворе соляной кислоты, наличие металломагнитной примеси – по ГОСТ 5901-2014. Изделия кондитерские. Методы определения массовой доли золы и металломагнитной примеси; активной кислотности (*pH*) – по ГОСТ 5898-87 Изделия кондитерские. Методы определения кислотности и щелочности; растворимость образцов меланина в воде / подсолнечном масле проверяли путем добавления 10 мл воды / масла к 0,05 г меланина при перемешивании при 25°C в течение 1 ч, затем фильтровали и регистрировали поглощение растворов спектрофотометрически при 220 нм на спектрофотометре Shimadzu UV1800 по [18]; влагоудерживающую способность (ВУС) и жироудерживающую способность (ЖУС) образцов меланина – общепринятыми методами по [19].

После проведения экстракции, получили кристаллическое вещество тёмно-коричневого цвета с общим количеством выхода 30%. Идентификация выделенного меланина качественными реакциями показала, что его водные растворы обесцвечивались перекисью водорода H_2O_2 , а в присутствии перманганата калия $KMnO_4$ изменяли окраску с коричневой на зеленую с последующим выпадением осадка. Добавление хлорида железа III $FeCl_3$ приводило к выпадению осадка, который растворялся в присутствии избытка реактива. Согласно проведенным ранее исследованиям, такое поведение пигментов характерно для меланинов и свидетельствует о присутствии в их структуре хиноидных и фенольных компонентов [20].

Таблица 1 – Органолептические показатели образцов

Показатель	Какао-порошок	Меланин (контрольный)	Меланин (опытный)
Внешний вид	Мелкодисперсные частицы, без крупинок	Однородные всесторонне свободные мелкие твёрдые частицы различной формы.	Однородные всесторонне свободные мелкие твёрдые частицы различной формы.
Цвет	Однородный насыщенный коричневый	Однородный темно-коричневый с блеском	Однородный коричнево-черный с блеском
Вкус и аромат	Свойственные какао-порошку	Без запаха, вкус – пресный слегка вязущий	
Консистенция	порошкообразная		

Таблица 2 – Физико-химические показатели образцов ($n=3, M \pm m$)

Показатель / Требования ГОСТ 108-2014 Какао-порошок. ТУ (значения показателей для производственного какао-порошка)	Какао-порошок	Меланин (контрольный)	Меланин (опытный)
Массовая доля влаги, % / не более 7,5	5,2±0,1	4,8±0,3	4,3±0,3
Массовая доля жира (масла какао), % / от 9,0 до 12,0	9,4±0,7	–	–
Степень измельчения – остаток после просева, % / не более 2,0	1,0±0,1	1,6±0,1	1,8±0,1
Показатель активной кислотности, ед. pH / не более 7,1	6,3	6,0	5,9
Массовая доля общей золы, / не более 6,0	4,9±0,6	5,2±0,6	5,4±0,6
Массовая доля золы, не растворимой в растворе соляной кислоты массовой долей 10%, % / не более 0,2	0,12±0,02	0,15±0,02	0,18±0,02
Массовая доля металломагнитной примеси (частицы не более 0,3 мм в наибольшем линейном измерении), % / не более 0,0003	Отсутствуют		

Из данных таблицы 1 видно, что образцы обладают однородной порошкообразной консистенцией, при растирании между пальцами нет ощущения крупинок, запах и вкус – присущие исходному сырью, без затхлости и плесени, посторонние запахи и привкусы не обнаружены. Образцы меланина по внешнему виду текстуре похожи на какао-порошок, однако цвет их более выражен, у опытного образца меланина наиболее интенсивный, коричнево-черный. Данные органолептической оценки позволяют рассматривать меланин как ингредиент, который может частично

заменить какао-порошок в составе кондитерской какао-содержащей глазури.

Методом тонкослойной хроматографии определено количество компонентов в кристаллическом осадке, а также в маточном растворе. На рисунке 1 представлена полученная хроматограмма для системы хлороформ:метанол:триэтиламин (8:1:1).

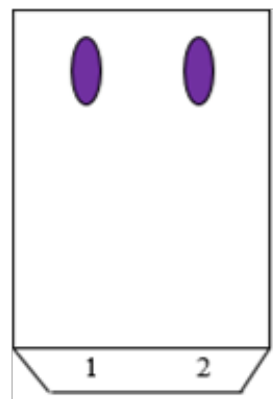


Рисунок 1 – Хроматограмма опытного образца меланина в сравнении с контрольным образцом в системе хлороформ:метанол:триэтиламин (8:1:1):

1 – опытный образец меланина; 2 – контрольный образец меланина

Образец меланина в виде порошка по внешнему виду и дисперсности / текстуре очень похож на какао-порошок и может частично заменить его в составе кондитерской глазури. В связи с этим определены значения показателей качества образцов меланина и какао-порошка (табл. 1 и табл. 2).

заменить какао-порошок в составе кондитерской какао-содержащей глазури.

В эксперименте установили, что по влажности порошки меланина соответствуют образцу какао-порошка, показатель *pH* образцов меланина находится в интервале 5,9–6,0 ед. *pH*, т. е. ниже активной кислотности образца какао-порошка, что, с точки зрения технологии глазурей, не повлечет изменение технологических параметров отдельных стадий, в частности – гомогенизации, с меланином в составе глазурей, для формирования стандартных свойств готовой какаосо-

держашей глазури.

Далее определены технологические свойства образцов. При исследовании растворимости образцов меланина установлено, что в воде они растворяются не полностью – растворимость контрольного образца составила 26,8 %, опытного – 26,6%. Жирорастворимость образцов меланина определить не удалось, поскольку при размешивании образца меланина в масле образуются устойчивые эмульсии, что не дает возможности определить степень жирорастворимости.

Высокая способность удерживать воду в пищевых продуктах (хлебобулочных, кондитерских и т.д.) позволяет повышать выход готовой продукции, улучшает текстуру, удлиняет сроки хранения, предотвращая их от черствости, что очень важно для кондитерской глазури.

ВУС выражали в процентах к общему объему внешней воды. Анализ полученных данных показал, что набухание частиц мелкодисперсного меланина происходит медленно и постепенно. Пик ВУС отмечался через 60 мин набухания и составил 149,7%. Это связывали с постепенным проникновением воды в частицы меланина, а также более крупными и неоднородными частицами, получаемыми при простом измельчении. Влагосвязывающая способность меланина составляет 99,79% что определяется, главным образом, разветвленной структурой с большим количеством гидроксильных групп, удерживающих воду за счет электростатических взаимодействий. Также, в составе образца меланина присутствует остаточное количество целлюлозы и гемицеллюлоз, имеющих развитую систему субмикроскопических капилляров, что определяет способность поглощать и удерживать воду. Максимальная жиродерживающая способность меланина составила 90 %, что является достаточно высокой и отвечает за сохранность количества массы продукта.

Данные характеристики способствуют сохранению в продукте предусмотренное рецептурой количество влаги и жира в процессе его производства. Термическая обработка влечет физико-химические изменения состава ингредиентов: так, некоторая часть влаги и жира отделяется в виде бульонно-жировых оттоков, что влечет потерю массы. В составе продукта остаются удержанные жир и вода, содержание которых и обуславливает влаго- и жиродерживающую способность сырьевого ингредиента.

Полученные значения ВУС и ЖУС опытного образца меланина доказывают его технологическую адекватность и делают возможным его использование в технологии различных кондитерских полуфабрикатов, в частности, какаосодержащей глазури.

Ранее определены функциональные свойства меланина, выделенного из лужги гречихи посевной: экспериментально установлена способность образца меланина связывать ионы меди: один грамм 0,5%-го раствора экстракта меланина гречневой лужги связал 966,6 мг/мл меди, а АОА одного грамма экстракта меланина соответствует АОА 0,056 г рутин. Показано,

что, меланин может быть использован как антиоксидант и биосорбент [3].

Получены экспериментальные образцы какаосодержащей глазури по классической рецептуре традиционным способом с заменой какао-порошка мелкодисперсным порошком меланина в количестве 3, 6, 9, 12 и 15%. Дегустационная оценка внешнего вида, цвета, аромата, вкуса, консистенции, сладости, послевкусия и общего восприятия опытных образцов глазури показала, что порошок меланина может быть использован в качестве потенциального заменителя какао-порошка благодаря его высокой биологической ценности и хорошим сенсорным свойствам.

Заключение. Таким образом, контроль качества входящих в рецептуру ингредиентов необходим для получения кондитерского полуфабриката, отвечающего требованиям государственных стандартов и потребителей. Опытный образец меланина по внешнему виду и дисперсности похож на какао-порошок и может частично заменить его в составе кондитерской глазури. В эксперименте установили, что по влажности образец соответствует какао-порошка, показатель *pH* образцов меланина находится в интервале 5,9–6,0 ед. *pH*, что ниже активной кислотности образца какао-порошка. Полученные значения ВУС и ЖУС опытного образца меланина свидетельствует о его более высоких технологических свойствах и делают возможным его применение в различных технологии кондитерских полуфабрикатов, в частности, какаосодержащей глазури.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Kurian, N.K. Food, cosmetic and biological applications of characterized DOPA-melanin from *Vibrio alginolyticus* strain ВТККS3 / N.K. Kurian, S.G. Bhat. – Direct text. // Applied Biological Chemistry. – 2018. – V. 61. – P. 163-171. DOI:10.1007/s13765-018-0343-y
2. Пат. 2215761 Российская Федерация, МПК C09B 61/00 (2000.01). Способ получения пигмента-красителя из растительного сырья: №: 2000116048/13; заявл. 19.06.2000; опубл. 10.06.2002 / Огарков Б.Н., Самусенок Л.В.; патентообладатели Огарков Б.Н., Самусенок Л.В.
3. Школьникова, М.Н. Обоснование использования лужги гречихи для получения функциональных пищевых красителей / М.Н. Школьникова, Е.А. Кадрицкая // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2020. – № 4. – С. 22-28. DOI: 10.17586/2310-1164-2020-10-4-22-28.
4. Грачева, Н. В. Способ получения меланина из лужги подсолнечника и исследование его антиоксидантной активности / Н. В. Грачева, В. Ф. Желтобрюхов // Вестник технологического университета. – 2016. – Т.19. – № 15. – С. 154-157.
5. Пат. 2747688 Российская Федерация, МПК C09B 61/00 (2006.01) / C09B 67/04 (2006.01). Пищевой пигмент-краситель из лужги гречихи и способ его получения: № 2020124806; заявл. 27.07.2020; опубл. 12.05.2021 / Абрамов С.Ю., Ломовский И.О., Ломовский О.И.; патентообладатель ФГБОУ науки «Институт химии твердого и механохимии СО РАН».
6. Пат. 2545349 Российская Федерация, МПК A23J 1/12 (2006.01)/A23J 3/14 (2006.01)/A23J 3/32 (2006.01)/A23J 3/34 (2006.01). Способ получения гидролизата из шелухи гречихи в качестве замены какао-порошка для пряничных и кондитерских изделий: № 201315481/10; заявл. 10.12.2013; опубл. 27.03.2015 / Кушнаренко Л.В., Лёвочкина Л.В.; патентообладатель ФГБАУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет».
7. Надточий, Л.А. А Влияние температурного режима на вязкостные свойства глазури / Л.А. Надточий, А.И. Лепешкин, Е.Д. Дудник, А.В. Проскура, М.Б. Мурадова, Р.М. Мельчаков // Вестник КамчатГТУ. – 2018. – № 45. – С. 43-49. – DOI: 10.17217/2079-0333-2018-45-43-49.

8. Линовская, Н.В. Изучение технологической адекватности сырьевых компонентов, используемых в производстве шоколадного полуфабриката / Н.В. Линовская, Э.В. Мазукабова, Н.Б. Кондратьев, Э.Н. Крылова // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2019. – Т. 22. – № 3. – С. 404-412. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-3-404-412.
9. Фединишина, Е.Ю. Обоснование технологии мучных кондитерских изделий с использованием вторичных пищевых ресурсов / Е.Ю. Фединишина, С.А. Елисеева, Е.В. Москвичева, А.Ю. Насрединова // Индустрия питания|Food Industry. – 2020. – Т. 5. – № 2. – С. 13-20. DOI: 10.29141/2500-1922-2020-5-2-2.
10. Кузнецова, Е.А. Использование экстракта микроводоросли *Dunaliella salina* в технологии желеино-фруктового мармелада / Е.А. Кузнецова, Я. Бриндза, Е.В. Климова, А.Б. Боровков, И.Н. Гудвиллов, Я.Д. Жондарева, Е.Ал. Кузнецова // Индустрия питания|Food Industry. – 2019. – Т. 4. – № 2. – С. 14-19. DOI: 10.29141/2500-1922-2019-4-2-2.
11. М.Н Школьникова. К возможности использования пектина из выжимок дикорастущих ягод в рецептуре мармелада // Индустрия питания|Food Industry. – 2019. – Т. 4. – № 1. – С. 81–86. DOI: 10.29141/2500-1922-2019-4-1-9.
12. Магомедов, Г.О. Микробиологическая безопасность порошка из какаоеллы для использования в кондитерских изделиях повышенной пищевой ценности / Г.О. Магомедов, И.В. Плотникова, Н.П. Зацепилина, А.В. Кривошеева // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК-продукты здорового питания. – 2016. – № 3. – С. 100-107.
13. Лукина, С.И. Применение нетрадиционного сырья в производстве бисквитно-сбивного печенья / С. И. Лукина, Е. И. Пономарева, И. П. Пешкина, Х. Ю. Боташева // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2018. – № 1. – С. 56–59.
14. Stankov, S. Rheological and sensory properties of glazes prepared with carob and cocoa powders / S. Stankov, M. Dzhivoderova-Zarcheva, E. Dimitrova, M.a Damyanova-Bakardzhieva, H. Fidan // Journal of Food Processing and Preservation. 2020; 44:e14580. DOI: 10.1111/jfpp.14580.
15. Tkeshelashvili, M.E. Quality improvement and shelf life of sweets of the Assorty type / M.E. Tkeshelashvili, G.A. Bobozhonova, A.B. Sorokina, G.O. Magomedov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 640, International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials 26-29 February 2020, Voronezh, Russian Federation, 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 640 052015.
16. Gorodyska, O. Investigation of the safety grapesed powder as an alternative to cocoa-powder in a confectionery glaze / O. Gorodyska, N. Grevtseva, O. Samokhvalova, O. Savchenko, A. Grygorenko // Харчова наука і технологія / Food science and technology. – 2018. – V. 12. – I. 3. – С. 64-72.
17. Сушинская, Н.В. Меланины трутовых грибов / Н.В. Сушинская, В.П. Курченко // Труды Белорусского государственного университета. Серия: физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем. – 2006. – Т. 1. – №1. – С. 147-157.
18. Wan, X. Isolation of a novel strain of *Aeromonas media* producing high levels of dopa-melanin and assessment of the photoprotective role of the melanin in bio-insecticide applications / X. Wan, H.M. Liu, Y. Liao, Y.Su, J. Geng, M.Y. Yang, X.D. Chen, P. Shen // Journal of Applied Microbiology. – 2007. – V. 103. – P. 2533-2541. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2007.03502.x.
19. Гуров, Н.В. Методы определения функциональных свойств соевых белковых препаратов / Н.В. Гуров, И.А. Попело, В.В. Сучков // Мясная индустрия. – 2001. – № 9. – С. 30-32
20. Каргушина, Ю.Н. Получение меланина на основе отходов маслоэкстракционного производства Ю.Н. Каргушина, М. А. Кириченко, Г. А. Севрюкова // Вестник технологического университета. – 2016. – Т.19. – № 16. – С. 124-26.

Статья поступила в редакцию 02.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 614.839

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0032

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЦЕНАРИЕВ АВАРИЙ С ОБРАЗОВАНИЕМ ОГНЕННОГО ШАРА

© 2021

Пермяков Владимир Николаевич, доктор технических наук,
профессор кафедры «Техносферная безопасность»

Мартынович Владимир Леонидович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Техносферная безопасность»

Хайруллина Лариса Батыевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность»

*Тюменский индустриальный университет
(625000, Россия, Тюмень, улица Володарского, 38,*

e-mails: permjakovvn@tyuiu.ru, martynovichvl@tyuiu.ru, hairullina.1964@mail.ru)

Аннотация. Обеспечение взрывопожаробезопасности опасных производственных объектов нефтегазового комплекса является актуальной задачей. Нормативными правовыми актами по анализу риска аварий на нефтегазовых опасных производственных объектах, утвержденными приказами Ростехнадзора, среди прочих предусматривается необходимость рассмотрения сценария аварии с образованием огненного шара. Однако, для реализации указанного сценария аварии необходимо выполнение ряда условий, в том числе: опасное вещество, участвующее в аварии должно обладать определенными взрывопожароопасными свойствами, его количество должно быть значительным и составлять несколько десятков тонн, а разрушение технологического оборудования должно быть внезапным и катастрофическим. В целях более глубокого понимания физической сущности процессов и явлений, происходящих в момент разрушения технологического оборудования, образования, формирования и существования огненного шара, а также прекращения горения выброшенного опасного вещества в статье сделана попытка описания термодинамической модели огненного шара – одного из наиболее опасных по последствиям сценариев аварий на опасных производственных объектах нефтегазового комплекса. Положения, представленные в статье, позволят более тщательно изучить явление огненного шара и, как следствие, привести к разработке мероприятий по повышению пожаробезопасности нефтегазовых объектов.

Ключевые слова: огненный шар, авария, катастрофическое разрушение, термодинамическая модель.

THERMODYNAMIC MODEL OF FIREBALL ACCIDENT SCENARIOS

© 2021

Permyakov Vladimir Nikolaevich, doctor of technical Sciences,
professor of the Department of «Technosphere Safety»

Martynovich Vladimir Leonidovich, candidate of technical Sciences,
associate professor of the Department of «Technosphere Safety»

Khayrullina Larisa Batyevna, candidate of technical Sciences,
associate professor of the Department of «Technosphere Safety»

*Tyumen Industrial University
(625000, Russia, Tyumen, street Volodarskogo, 38,*

e-mails: permjakovvn@tyuiu.ru, martynovichvl@tyuiu.ru, hairullina.1964@mail.ru)

Abstract. Ensuring the explosion and fire safety of hazardous production facilities of the oil and gas complex is an urgent task. Regulatory legal acts on the analysis of the risk of accidents at oil and gas hazardous production facilities, approved by the orders of Rostekhnadzor, among others, provide for the need to consider the scenario of an accident with the formation of a fireball. However, in order to implement this accident scenario, a number of conditions must be met, including: the hazardous substance involved in the accident must have certain explosive and fire-hazardous properties, its quantity must be significant and amount to several tens of tons, and the destruction of technological equipment must be sudden and catastrophic. In order to better understand the physical essence of the processes and phenomena occurring at the time of destruction of technological equipment, the formation, formation and existence of a fireball, as well as the cessation of burning of the ejected hazardous substance, the article attempts to describe the thermodynamic model of a fireball – one of the most dangerous scenarios for accidents at hazardous production facilities of the oil and gas complex. The provisions presented in the article will allow a more thorough study of the phenomenon of a fireball and, as a result, lead to the development of measures to improve the fire safety of oil and gas facilities.

Keywords: fireball, accident, catastrophic destruction, thermodynamic model.

Введение. В соответствии с действующей нормативно-технической документацией [1-11] при проектировании, строительстве, эксплуатации, консервации и ликвидации нефтегазовых опасных производственных объектов необходимо проведение анализа риска

возможных аварий.

Одними из основных этапов анализа риска аварий [7-11] являются: а) оценка возможных сценариев аварий на опасном производственном объекте; б) оценка количества опасного вещества, участвующего в ава-

рии и в создании поражающих факторов; в) оценка размеров зон действия поражающих факторов.

Рассмотрение объективного перечня возможных сценариев аварийных ситуаций для конкретного технологического оборудования и конкретного опасного вещества является актуальной задачей.

Материалы и результаты исследования. *Теоретическая часть.* Многообразие возможных сценариев развития аварийных ситуаций зависит от ряда факторов: физико-химических свойств обрабатываемых в технологическом оборудовании опасных веществ, эксплуатационных условий содержания опасных веществ в технологическом оборудовании (давление, температура), атмосферных условий и т.д.

Одним из возможных сценариев аварий, рекомендуемых нормативными правовыми актами в области пожарной и промышленной безопасности к рассмотрению при анализе риска аварий на нефтегазовых опасных производственных объектах, является сценарий с образованием огненного шара [9, 10].

В действующих нормативно правовых актах, литературных источниках и справочниках приводятся следующие определения для описания вышеуказанного явления.

Согласно п. 3.11 [12] огненный шар – это крупномасштабное диффузное горение, реализуемое при разрыве резервуара с горючей жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого резервуара.

Согласно п. 2 Руководства по оценке пожарного риска для промышленных предприятий [13] огненный шар – крупномасштабное диффузное пламя сгорающей массы распыленного жидкого топлива или

парового облака, поднимающееся над поверхностью земли.

Согласно приложению №2 Руководство по безопасности [10] огненный шар – крупномасштабное диффузионное пламя, реализуемое при сгорании парогазового облака с концентрацией горючего выше верхнего концентрационного предела распространения пламени. Такое облако может быть реализовано, например, при разрыве резервуара с горючей жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого резервуара.

Согласно [15] огненный шар – это объем сгорающей массы топлива или парового облака, поднимающийся над поверхностью земли.

Последствия документально зафиксированных сценариев аварий с образованием огненного шара подробно описаны в источнике [15] и характеризуются значительными размерами зон действия поражающих факторов, а также существенным материальным, социальным и экологическим ущербом.

В таблице 8.4 [15] Маршаллом приведена классификация пожароопасных веществ и установлено, что вероятнее всего появление огненного шара возможно в случаях аварийных ситуаций с участием следующих взрывопожароопасных веществ (жидкостей и газов): легковоспламеняющаяся жидкость с температурой вспышки минус 45°C и ниже (например, диэтиловый эфир); криогенная или охлажденная жидкость (сжиженный природный газ); сжиженный воспламеняющийся газ (например, пропилен); сжатый воспламеняющийся газ (например, этилен).

В таблице 1 продублированы сведения из таблицы 8.4 [15].

Таблица 1 – Таксономия опасностей пожаров жидкостей и газов при многотонных разливах

Классификация по Маршаллу	Пример	Температура вспышки, °	Давление паров при 20°	Часть разделения	Вероятность зажигания				Вероятность появления		
					на расстоянии, м				вспышечного пожара	пожара разлива	огненного шара
					0	1	10	100			
1. Горючая жидкость	Смазочное масло	-	0,0001	незначительная	нулевая	нулевая	нулевая	нулевая	нулевая	только при возгорании	нулевая
2. Воспламеняющаяся жидкость	п-Ксилол	40	0,008	0,0005	умеренная	нулевая	нулевая	нулевая	нулевая	высокая	нулевая
3. Легковоспламеняющаяся жидкость	Октан	13	0,013	0,0015	высокая	высокая	низкая	низкая	умеренная	высокая	нулевая
4. Легковоспламеняющаяся жидкость	Диэтиловый эфир	-45	0,58	0,024	высокая	высокая	низкая	умеренная	высокая	высокая	низкая
5. Криогенная или охлажденная жидкость	СПГ	ниже -160	0,1 (-160°)	0,04	высокая	высокая	низкая	высокая	высокая	высокая	низкая
6. Сжиженный воспламеняющийся газ	Пропилен	-107	1	0,4	высокая	высокая	низкая	высокая	высокая	иногда нет жидкой фазы	высокая
7. Сжатый воспламеняющийся газ	Этилен			1,0	высокая	высокая	низкая	высокая	высокая	нулевая	высокая

Факты образования огненного шара в результате разгерметизации технологического оборудования, в котором обращается сжиженный или сжатый воспламеняющийся газ, достаточно подробно описаны в ряде литературных источников [15] и не подлежат сомнению.

Вероятность же появления огненного шара в результате аварийной ситуации с участием иных веществ, перечисленных в таблице 1 (легковоспламе-

няющиеся жидкости с температурой вспышки плюс 13°C и выше, воспламеняющиеся и горючие жидкости), равна нулю.

Анализ действующих нормативно правовых актов [12-14, 17], а также литературных источников [15, 20] свидетельствует о том, что огненный шар характеризуется двумя основными расчетными значениями (диаметром огненного шара и временем его существования), которые зависят от массы опасного вещества,

участвующего в данном сценарии аварии.

Однако в литературных источниках и нормативно правовых актах отсутствует информация о последовательности событий, явлений и процессов, способствующих образованию, формированию и прекращению существования огненного шара. То есть явление огненного шара остается малоизученным.

На основании анализа данных по авариям с огненными шарами, приведенных в научно-технической литературе, а также нормативно правовых актах, в статье предлагается к рассмотрению теоретическая модель и описание последовательности событий, явлений и процессов, способствующих образованию, формированию и прекращению существования огненного шара.

Указанное описание последовательности событий, явлений и процессов позволит более тщательно изучить явление огненного шара и, как следствие, приведет к разработке мероприятий по предупреждению воздействия поражающих факторов огненного шара и (или) сокращению их интенсивности.

Практическая часть. В качестве примера опасного вещества для моделирования огненного шара принят воспламеняющийся газ – пропан, являющийся химически чистым горючим веществом, температура кипения которого в жидком состоянии при атмосферном давлении составляет минус 42°C.

При положительных температурах пропан может находиться в жидком состоянии только в сосудах, работающих под давлением.

Согласно статистическим данным, которые приведены в литературных источниках [15], для образования и формирования огненного шара необходимо значительное количество опасного вещества. Следовательно, объем сосуда, в котором осуществляется обращение опасного вещества, должен составлять несколько десятков и даже сотен кубических метров. При этом поступление (выброс) значительного количества опасного вещества в атмосферу должно быть скоротечным и мгновенным, например, как при полном катастрофическом разрушении сосуда хранения.

Таким образом, после катастрофического разрушения сосуда, значительная масса жидкого пропана окажется в атмосферных условиях (P_a , T_a). Однако, при атмосферном давлении P_a пропан должен находиться в газообразном состоянии, следовательно, начнется объемное взрывное вскипание жидкого пропана с увеличением занимаемого объема. Последнее приведет к образованию двухфазной среды в объеме шара. Процесс объемного вскипания будет протекать на протяжении некоторого времени, в течение которого вся масса жидкого пропана M_0 перейдет в парообразное состояние. При этом образовавшиеся пузырьки газа распределяться по всему объему более или менее равномерно.

Поскольку гидростатическое давление действует по всем направлениям одинаково, образующийся пар будет формировать фигуру похожую на шар, стремительно увеличивающийся в диаметре, до тех пор, пока

вся масса выброшенного жидкого опасного вещества M_0 не перейдет в парообразное состояние.

При наличии источника зажигания в зоне распространения парогазового облака произойдет его воспламенение. Однако, горение парогазового шарообразного облака будет происходить только по его «поверхности», где имеется возможность смешения горючего вещества с окислителем (кислородом воздуха). Горение же внутри парогазового облака происходить не будет ввиду отсутствия окислителя.

В некоторый момент возможен подъем огненного шара над поверхностью земли. Это обусловлено тем, что с учетом повышения температуры средняя плотность парогазового облака, образующего шар, станет меньше плотности воздуха.

По мере выгорания горючего вещества с «поверхности» парогазового облака диаметр шара D будет постепенно уменьшаться, до полного выгорания горючего вещества в облаке. Время с начала расширения огненного шара до полного его исчезновения и определяет время существования огненного шара t .

Закключение. При выводе аналитических зависимостей диаметра огненного шара и времени его существования необходимо учитывать термодинамические процессы, связанные с фазовым переходом, расширением и горением.

Предлагаемая модель позволяет описать и глубже понять физическую сущность процессов, протекающих при образовании, формировании и горении парогазового облака в атмосферных условиях, которые возникают при аварийных ситуациях с образованием огненных шаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 декабря 2020 года № 517 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности для опасных производственных объектов магистральных трубопроводов» [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс»: сайт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573174913> (дата обращения 06.10.2021).
2. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 декабря 2020 года № 521 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности объектов сжиженного природного газа» [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс»: сайт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573140265> (дата обращения 06.10.2021).
3. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 года № 530 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности автогазозаправочных станций газомоторного топлива» [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс»: сайт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573200385> (дата обращения 06.10.2021).
4. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 года № 533 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс»: сайт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573200380> (дата обращения 06.10.2021).
5. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 года № 534 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности» [Электронный ресурс]

// Консорциум «Кодекс»: сайт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573230594> (дата обращения 06.10.2021).

6. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 года № 532 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности для объектов, использующих сжиженные углеводородные газы» [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс»: сайт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573264124> (дата обращения 06.10.2021).

7. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». Серия 27. Выпуск 16 – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016. – 56 с.

8. Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа». Серия 08. Выпуск 42 – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2019.

9. Руководство по безопасности «Методика анализа риска на опасных производственных объектах нефтегазодобычи». Серия 08. Выпуск 28 / Колл. авт. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2019.

10. Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности». Серия 09. Выпуск 45 / Колл. авт. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2019.

11. Руководство по безопасности «Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов». Серия 08. Выпуск 30 / Колл. авт. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016.

12. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля; национальный стандарт Российской Федерации; издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. №1971-ст; введен взамен ГОСТ Р 12.3.047-98; дата введения – 2014-01-01; разработан Федеральным государственным бюджетным учреждением «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» МЧС России (ФГБУ «ВНИИПО» МЧС России). – Москва: Стандартинформ, 2014. – 62 с. – Текст: непосредственный.

13. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий. – М.: ФГБУ «ВНИИПО» МЧС России, 2006 – 92 с.

14. Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс»: сайт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902170886> (дата обращения 05.10.2021).

15. Маршалл В. Основные опасности химических производств. – М.: Мир, 1989. – 672 с.

16. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром»: СТО Газпром 2-2.3-351-2009; утв. распоряжением ОАО «Газпром» № 83 от 30.03.2009; введ в действие с 30.12.2009. – Москва: ООО «Газпром-экспо», 2009. – 377 с.

17. Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром»: СТО Газпром 2-2.3-400-2009; утв. распоряжением ОАО «Газпром» № 326 от 05.10.2009; введ в действие с 05.10.2009. – Москва: ООО «Газпром-экспо», 2009. – 362 с.

18. Пермяков В.Н., Мартынович В.Л., Хайруллина Л.Б. Обоснование возможных сценариев аварий на объектах нефтегазодобычи // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021» (20-23 сентября 2021 г.) / под ред. Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук. – Севастополь: СевГУ, 2021. – С. 496-499.

19. Мартынович В.Л. Оценка поражающих факторов аварий на взрывопожароопасных производствах: учебное пособие / В.Л. Мартынович, М.В. Омельчук, Л.Б. Хайруллина; Тюменский индустриальный университет. – Тюмень: ТИУ, 2018. – 78 с.

20. Комаров А.А., Шангараев Р.Р. Определение поражающих факторов при авариях, сопровождаемых огненными ша-

рами // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. № 3. С. 20-25.

21. Комаров А.А., Шангараев Р.Р. Исследование кинематики огненного шара // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2021. № 1. С. 58-63.

Статья поступила в редакцию 07.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 004

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0033

СПОСОБ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА СИГНАЛА В СИСТЕМАХ ДИНАМИЧЕСКОГО РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ НА ТРАНСПОРТЕ

©2021

Юданов Петр Максимович, кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры Механики и инженерной графики
Академия гражданской защиты МЧС России

(141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, Академия гражданской защиты МЧС России,
e-mail: reno128@yandex.ru)

Аннотация. Данная работа относится к области разработки и совершенствования алгоритмов обработки сигналов высокочувствительных средств и систем динамического дозиметрического контроля для предотвращения ЧС радиационного характера в целях защиты населения и территорий от поражающих факторов ионизирующего излучения. Целью данной работы является создание сопряжённой методики учёта сигналов высокочувствительных дозиметрических систем и кадров с установленной камеры, для лучшего контроля и локализации источника ионизирующих излучений без ущерба и замедления потока автомобилей. Результатами данной статьи можно считать построенный алгоритм работы системы синхронной обработки данных от съёмки в диапазоне видимого света и гамма излучения с последующей обработкой и фильтрацией сигналов, с учётом векторных корректировок и преобразований Махаланобиса для улучшения учёта фона и теневого экранирования при появлении сигнала. Результаты данной работы будут полезны подразделениям МЧС России и контролирующим органам предприятий атомной промышленности и дорожной инфраструктуры для контроля и быстрого обнаружения источников ионизирующих излучений в автомобильном транспорте на высоких скоростях. Важнейшими методами, использованными в данной работе, являлись методы векторной алгебры, теории вероятностей и деревьев построения решений. Для визуализации было использовано программное обеспечение и пакет программ MathLab. Использование совмещённого алгоритма оценки транспортного потока позволяет с одной стороны отслеживать транспортное средство с замеченным сигналом-меткой ионизирующего излучения достаточно долго для идентификации источника излучения с достаточной вероятностью, в пределах трёх «сигма». С другой стороны совмещённые снимки с видеокамеры позволяют локализовать указанный автомобиль с последующей его изоляцией без остановки и дополнительной проверки всего транспортного потока.

Ключевые слова: системы дозиметрического контроля, радиационная авария, источник излучения, динамический радиационный контроль, способы обработки сигналов.

A FAST METHOD FOR SIMULATING RADIATION MAP BY INTERPOLATION IN A VIRTUAL ENVIRONMENT

©2021

Yudanov Petr Maksimovich, candidate of technical sciences,
senior lecturer of the Department of Mechanics and Engineering drawing
Academy of Civil Defense of the Emergency Ministry of Russia

(141435, Moscow region, Khimki, Novogorsk microdistrict, Academy of Civil Protection EMERCOM of Russia,
e-mail: reno128@yandex.ru)

Abstract. This work relates to the development and improvement of algorithms for processing signals of highly sensitive means and systems of dynamic dosimetric control to prevent radiation emergencies in order to protect the population and territories from the damaging factors of ionizing radiation. The purpose of this work is to create a coupled methodology for recording signals from highly sensitive dosimetric systems and frames from an installed camera, for better control and localization of the source of ionizing radiation without damaging and slowing down the traffic flow. The results of this article can be considered the constructed algorithm for the operation of the system for synchronous processing of data from shooting in the range of visible light and gamma radiation with subsequent processing and filtering of signals, taking into account vector adjustments and Mahalanobis transformations to improve background accounting and shadow shielding when a signal appears. The results of this work will be useful to the EMERCOM subdivisions of Russia and the regulatory authorities of the nuclear industry and road infrastructure for monitoring and quickly detecting sources of ionizing radiation in road transport at high speeds. The most important methods used in this work were the methods of vector algebra, probability theory, and decision trees. The software and the MathLab software package were used for visualization. The use of a combined traffic flow estimation algorithm allows, on the one hand, to track a vehicle with a detected ionizing radiation tag signal long enough to identify a radiation source with a sufficient probability, within three "sigma". On the other hand, combined images from a video camera allow you to localize the specified vehicle with its subsequent isolation without stopping and additional checking of the entire traffic flow.

Keywords: radiation monitoring systems, radiation accident, radiation source, dynamic radiation monitoring, signal processing methods.

Введение. В последнее время большую актуальность имеет проблема радиационной безопасности населения и территорий, в особенности при масштабных грузоперевозках и слабом контроле грузов. До 200 инцидентов происходит ежегодно, в результате которых происходит облучение населения или загрязнение территорий, что связано, в том числе, с отсутствием должного радиационного контроля грузоперевозок [1, 2]. Одним из способов повышения эффективности радиационного контроля автотранспорта является применение высокочувствительных стационарных дозиметрических систем.

В работах [1, 2, 8, 10] были представлены технические воплощения детекторных систем и усовершенствованные алгоритмы обесчёта сигналов для обнаружения источников ионизирующего излучения с превышением мощности дозы над фоном в 4 нЗв/ч при расположении детекторов с двух сторон однополосной дороги и скорости движения транспорта не более 10-15 км/ч. Однако в реальных условиях, помимо надёжности обнаружения превышения фона, детекторная система не должна создавать помехи дорожному движению и точно определять место (конкретный автомобиль), в котором наблюдается превышение фона [12-14].

Исходя из вышеизложенного, при реальном контроле грузоперевозок мощность дозы источника значительно превышает фон, а скорость транспорта по нескольким полосам составляет от 40 до 60 км/ч. Большинство современных алгоритмов и детекторных систем β и γ излучения, основанных на сцинтилляционном принципе, показывают высокую частоту ложных срабатываний в таких условиях [6-9]. Это связано с тем, что при расположении детектора около каждой полосы движения, вероятность ложного срабатывания всей системы увеличивается многократно, к тому же сильно замедляя движение по всем полосам в случае срабатывания, из-за невозможности определить в каком автомобиле находится источник.

Материалы и результаты исследования. Для решения данной проблемы нами были взяты алгоритмы построения радиационной «карты» интенсивности радиационных сигналов, используемые в передвижных дозиметрах, для высокочувствительных систем дозиметрического контроля типа «СИММЕТ», с последующим дополнением их системами видеонаблюдения. При проезде находящегося в транспорте источника излучения в радиус обнаружения системы контроля, происходит увеличение её показаний, которые растут по мере приближения источника и затем уменьшаются при его отдалении, образуя одномерное (зависящее только от расстояния до источника) распределение мощности дозы излучения, попавшего в детектор [15-20], как это показано на рисунке 1. Однако этого мало для точного определения, в каком именно автомобиле находится источник, поэтому для пространственного уточнения положения источника были добавлены показания видеокamеры, которые учитываются одновременно с детектором.

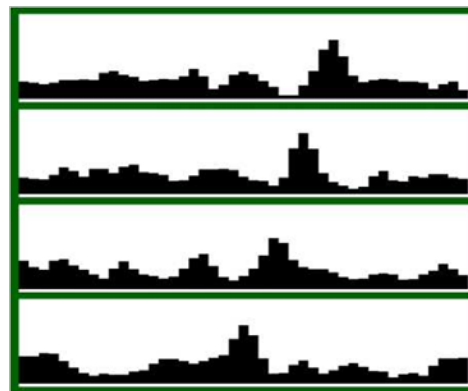


Рисунок 1 – Гистограмма сигнала детектора

Данные камеры: видеокamera была установлена на высоте 5 метров над уровнем дороги так, чтобы захватывать 70 метров до и после расположения детектора и синхронизирована с обрабатывающим устройством детектора, считывая показания раз в 0,25 секунды. Выбор времени был обусловлен скоростью реагирования сцинтиллятора на излучение. Данные сохраняются в файл и далее доступны для ручной обработки. Далее автоматический алгоритм анализа изображений проводил поиск транспорта, определяя его длину, ширину и местоположение, как это показано на рисунке 2.

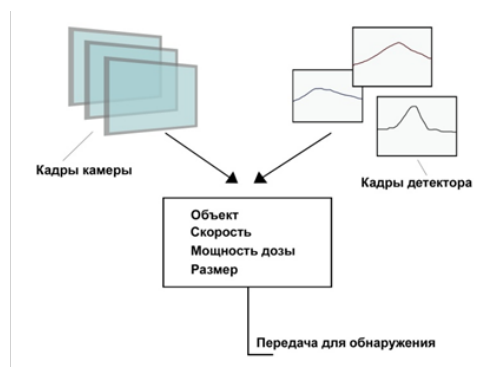


Рисунок 2 – Логическая схема детекторной системы

Отдельные кадры, снятые камерой анализируются и при появлении новой единицы транспорта в радиусе действия системы, транспорту присваивается имя и физические координаты, которые рассчитываются исходя из динамики совместных показаний камеры и детектора. Результатом является программное создание объекта «автомобиль» со следующими свойствами: размер, скорость движения, время появления и исчезновения, распределение мощности дозы. Далее этот объект может быть обработан любым другим программным обеспечением для определения номера и дальнейшего перехвата данного транспорта. Схематично это показано на рисунке 3.



Рисунок 3 – Схематичный захват изображений камерой и сравнительное расположение детектора

Данные детектора: сигнал детектора может различаться для разных изотопов, поэтому для каждого изотопа количество частиц, пройденных сквозь сцинтиллятор, рассчитывается на основе телесного угла вектора, ведущего к источнику к вектору нормали к плоскости сцинтиллятора, генерируемого путем моделирования детектора и источника с помощью распределения Монте-Карло, как показано в работах [5, 11]. «Кадр» детектора представляет собой одномерную мощность дозы от всех источников в данный момент времени.

Однако построив зависимость мощности дозы от времени, ограниченного проездом одного автомобиля через зону действия детектора, мы увидим типичную форму сигнала «колокол» [4], что связано с тем, что сам автомобиль экранирует фон от детектора до определенного предела сильнее, чем источник внутри его производит. Функция, описывающая эту зависимость, написана ниже.

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \left(1 - \frac{t^2}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

где ψ – функция мощности дозы,

σ – среднее квадратичное отклонение мощности дозы,

t – время с момента поступления сигнала с источника на детектор.

Чтобы снизить влияние упомянутого частичного экранирования на показания, необходимо учитывать корреляцию показаний во времени двух соседних детекторов [10-14], стоящих по двум сторонам от дорожной полосы, что было использовано для общей корректировки, как показано на рисунке 4.

Для того, чтобы снизить влияние флуктуаций мощности дозы, было применено так называемое расстояние Махаланобиса [3, 5] для определения вероятности того, что текущее измерение содержит аномальный изотопный источник путём оценки отношения мощности дозы каждого измерения (раз в 0.25 секунды) (i) к общей мощности дозы.

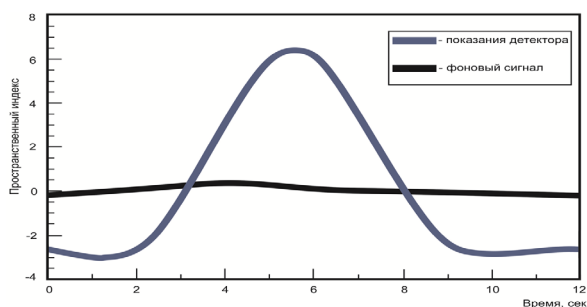


Рисунок 4 – Типовая форма сигнала «колокол»

На каждом временном шаге фоновое значение мощности дозы (B) сравнивается с текущим спектром мощности от источника (C), чтобы построить «спектральное расстояние» между этими векторами.

$$SD = \sqrt{\sum_i (B_i - C_i)^2}, \quad (2)$$

где SD (spectral distance) – спектральное расстояние между векторами,

B_i – вектор мощности фоновой дозы,

C_i – вектор мощности дозы от источника.

Затем сумма расстояний между этими векторами при каждом измерении и даёт величину, на которую можно будет корректировать порог обнаружения для повышения надёжности определения используемого способа, как это показано на рисунке 5.

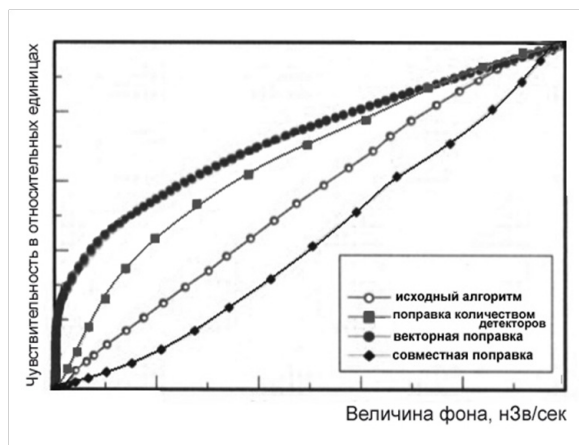


Рисунок 5 – Графики фона с различной корректировкой

Как видно из графика, векторная поправка обеспечивает большее нарастание чувствительности при низких значениях фона, что увеличивает вероятность обнаружения источника ионизирующего излучения низкой мощности в движущемся транспортном средстве.

Отдельного упоминания стоит ситуация, когда два автомобиля движутся с одинаковой скоростью, одновременно входя в радиус действия детектора, их сигналы на детекторе обрабатываются одинаково, однако координата на камере различна. Для определения точного расположения источника в таком случае необходим дополнительный детектор, расположенный в стороне от детекторной линии. В случае с автомобилями, движущимися рядом в одном потоке, система может воспринимать их как один объект, однако при передаче сигнала для их задержания, это не создаёт больших помех для трафика.

Закключение. Показана эффективность работы системы синхронной обработки данных съёмки в диапазоне видимого света и гамма излучения с последующей обработкой и фильтрацией сигналов.

Применено расстояние Махаланобиса и векторные преобразования для корректировки целесообразного уровня фона и улучшения способов обработки сигнала.

Разработана форма сигнала «колокол», учитывающая теневое экранирование сигнала транспортным средством с последующей корректировкой способа обнаружения источника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Валуев Н.П., Пушкин И.А., Лысова О.В. Аппаратура для высокопроизводительного контроля радиационной обстановки // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2010. – №2. – С. 21–24
2. Валуев Н.П., Лысова О.В., Никоненков Н.В., Пушкин И.А. Радиационный контроль движущихся транспортных

средств с помощью высокочувствительных дозиметрических систем // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2011. – №4. – С. 36-40.

3. David Michael Pfund, Robert C. Runkle, Kevin K. Anderson, and Kenneth D. Jarman, Examination of Count-Starved Gamma Spectra Using the Method of Spectral Comparison Ratios, IEEE Transact. Nucl. Sci., Vol. 54/4/2007

4. W. R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments", New York: Springer-Verlag, 1987, pp. 157–163.

5. MCNP X-5 Monte Carlo Team, MCNP - A General Purpose Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, LA UR 03 1987, Los Alamos National Laboratory, April 2003. The MCNP5 code can be obtained from the Radiation Safety Information Computational Center (RSICC), P. O. Box 2008, Oak Ridge, TN, 37831-6362.

6. Валуев Н.П., Никоненков Н.В., Сергеев И.Ю., Стасишин Л.А. Радиационный контроль транспортных средств с помощью переносных приборов и стационарных систем. Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. – 2015. – С.35-39.

7. Валуев Н.П., Лысова О.В., Сергеев И.Ю. Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2015. – №3. – С. 47-50.

8. Валуев Н.П., Пушкин И.А., Стасишин Л.А. Повышение эффективности контроля наземных транспортных средств высокочувствительных дозиметрических систем // ГРУЗОВИК. – 2013. – №8. – С. 44-48.

9. Валуев Н.П., Никоненков Н.В., Сергеев И.Ю., Стасишин Л.А. Радиационный контроль транспортных средств с помощью переносных приборов и стационарных систем // Ежемесячный научно-технический и производственный журнал «Грузовик». – 2015. – №9. – Москва: ООО «Издательство Машиностроение». – С. 35-39.

10. Сергеев И.Ю., Гарелина С.А., Латышенко К.П., Валуев Н.П. Математическое моделирование дозиметрических систем контроля // Научно-аналитический журнал: «Сибирский пожарно-спасательный вестник». – 2020. – № 1 (16). – Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. – С. 64-68.

11. Валуев Н.П., Сергеев И.Ю. Способ определения местоположения источника радиации в транспортном средстве при динамическом контроле // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2016. – №2. – Химки: Академия гражданской защиты МЧС России. – С. 70-75.

12. Сергеев И.Ю., Валуев Н.П. Способ определения местоположения источника радиации в транспортном средстве при динамическом контроле. Научный журнал «Научные и образовательные проблемы гражданской защиты». – 2016, – № 2, – С.70-75.

13. Сергеев И.Ю. Предложения по способам контроля радиационной обстановки для системы комплексной безопасности закрытого административного территориального образования с объектами атомной промышленности // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2016. – №1. – Химки: Академия гражданской защиты МЧС России. – С.63–71.

14. Валуев Н.П., Лысова О.В., Сергеев И.Ю. Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов. // Сборник докладов XX Международной научно-практической Конференции по проблемам защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций «Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий». Москва, 2015 года. – С. 169-171.

15. Сергеев И.Ю., Пашинин В.А., Валуев Н.П., Косырев П.Н. Способ аэродинамического контроля радиационной обстановки. Технологии гражданской безопасности. ВНИИ-ГОЧС МЧС России (ФЦ) Том 15 – 2018 – № 4 (58). – С. 84-87.

16. Сергеев И.Ю. Выбор методики определения вероятности обнаружения радиационной аномалии при динамическом контроле радиационной обстановки // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2019. – № 1 (12). – С. 8-11.

17. Валуев Н.П., Никоненков Н.В., Стасишин Л.А. Автомобильная система динамического радиационного мониторинга территорий. «Грузовик» – 2017, №2, С. 37-41.

18. Марков Г.С., Онищенко Ю.А., Щеголькова В.В., Макарова М.Ю. Особенности жизненного цикла аварийно-спасательной техники // Технологии гражданской безопасности – 2014. – №2. – Том: 11 – С.76-80.

19. Виноградов А.Ю., Баканов С.В., Потапенко Ю.П. Анализ современных и перспективных аварийно-спасательных машин, инструментов и приборов для оснащения формирований РСЧС и подготовки спасателей // Технологии гражданской безопасности – 2007. – №2. – Том: 4 – С.103-107.

20. Марков Г.С. Актуальные направления в развитии аварийно-спасательной техники и технологий. // Технологии гражданской безопасности – 2009. – №3-4. – Том: 6 – С.187-190.

Статья поступила в редакцию 24.09.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 331.451

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0034

ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ТРУДОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МАШИНИСТА МЕТРОПОЛИТЕНА

© 2021

Нарусова Елена Юрьевна, кандидат технических наук, доцент
Стручалин Владимир Гайозович, кандидат технических наук, доцент

Ковусов Азим Байрамович, аспирант

Травкина Ангелина Евгеньевна, аспирант

кафедра «Управление безопасностью в техносфере»

Российский университет транспорта

(127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9,

e-mails: e.narusova@ubt-rut-miit.ru, v.struchalin@ubt-rut-miit.ru, kovusov@rambler.ru, travkina-angellina@rambler.ru)

Аннотация. Метрополитен – основа транспортной системы многих крупных городов. Он связывает районы города, давая возможность жителям беспрепятственно передвигаться в самое напряженное время и обеспечивая наибольшую скорость перевозок пассажиров в любых погодных условиях, независимо от загруженности автодорог. Не случайно, например, доля перевозок пассажиров метро составляет 56% от всего общественного транспорта Москвы. Безусловно, надежность и безопасность работы метрополитена возможна только при наличии и устойчивой качественной работе высококвалифицированного штата машинистов поездов. При отборе в профессию машиниста метрополитена к кандидатам предъявляются достаточно жесткие требования соответствия определенным медицинским критериям. Машинистами поездов могут работать только люди, не имеющие заболеваний нервной системы, кровеносных сосудов, сердца, опорно-двигательного аппарата. Однако, эти заболевания могут быть приобретены машинистами метро на рабочем месте в процессе трудовой деятельности в результате воздействия вредных производственных факторов, среди которых существенная доля принадлежит эмоциональным нагрузкам, вызывающим психоэмоциональные проблемы у работников. В статье рассмотрены психоэмоциональные аспекты трудовой деятельности машинистов метрополитена и способы минимизации негативного влияния условий труда на их эмоциональное состояние и здоровье.

Ключевые слова: безопасность труда, вредные производственные факторы, психоэмоциональное состояние, эмоциональное выгорание, рабочее место, машинист электропоезда метрополитена, человеческий фактор.

PSYCHOEMOTIONAL ASPECTS OF EMPLOYMENT OF THE SUBWAY TRAIN DRIVER

© 2021

Narusova Elena Yurievna, candidate of technical sciences, associate professor
Struchalin Vladimir Gaiozovich, candidate of technical sciences, associate professor

Kovusov Azim Bayramovich, graduate student

Travkina Angelina Evgenievna, graduate student

Department «Management of safety in a technosphere»

Russian University of Transport

(127994, Russia, Moscow, Obraztsov St. 9, building 9,

e-mails: e.narusova@ubt-rut-miit.ru, v.struchalin@ubt-rut-miit.ru, kovusov@rambler.ru, travkina-angellina@rambler.ru)

Abstract. The metro is the backbone of the transport system in many large cities. It connects the districts of the city, giving residents the opportunity to move around freely during the busiest times and ensuring the highest speed of passenger transportation in all weather conditions, regardless of traffic congestion. It is no coincidence, for example, that the share of metro passenger traffic is 56% of all public transport in Moscow. Undoubtedly, the reliability and safety of the metro operation is possible only with the availability and stable high-quality work of a highly qualified staff of train drivers. When selected for the profession of a metro driver, candidates are subject to rather stringent requirements for meeting certain medical criteria. Only people who do not have diseases of the nervous system, blood vessels, heart, or musculoskeletal system can work as train drivers. However, these diseases can be acquired by metro drivers at the workplace in the course of work as a result of exposure to harmful production factors, among which a significant proportion belongs to emotional stress that causes psycho-emotional problems in workers. The article discusses the psychoemotional aspects of the labor activity of metro drivers and ways to minimize the negative impact of working conditions on their emotional state and health.

Keywords: occupational safety, harmful production factors, psycho-emotional state, emotional burnout, workplace, subway train driver, human factor.

Введение. Ежедневно в 50 странах мира 155 миллионов человек пользуются услугами метрополитена.

Среди наиболее загруженных – Токийский и Московский метрополитены. Московское метро пере-

возит более 9 млн. пассажиров в час пик и 2,4 млрд. пассажиров в год.

Метро как вид городского транспорта успешно развивается, строятся новые линии, создаются новые

рабочие места.

Для работы в профессиях, связанных с движением поездов требуются хорошее здоровье, специальное обучение и опыт, что неудивительно, поскольку работа в метрополитене достаточно вредная по целому ряду совокупности факторов трудового процесса, особенно по напряженности. Другой сопоставимый по значимости вредный фактор трудового процесса в метрополитене – это высокий уровень шума, который также характерен для рабочего места машиниста.

Работа машиниста требует таких качеств, как дисциплинированность, внимательность, умение быстро и правильно принимать решения в нормальном режиме работы, а также предпринимать неотложные действия в аварийной ситуации, что неразрывно связано с подходящими показателями профессиональной пригодности, хорошей профессиональной и психологической подготовкой [1]. Для работы машинистом метрополитена отбираются претенденты в возрасте до 35-ти лет, обладающие отличным зрением и хорошей реакцией, высокой ответственностью, желательное наличие технического образования. Машинист должен не только управлять подвижным составом, но и разбираться в особенностях его устройства и уметь выполнять некоторые слесарные работы.

При анализе возрастного состава машинистов обращает на себя внимание факт постоянного сокращения числа машинистов предпенсионного возраста, причиной которого является то, что примерно 20% из них состоят в группе лиц с возможностью возникновения осложнений сердечно-сосудистых заболеваний. На снижение профессионального долголетия значительное влияние оказывают невнимательное отношение к своему здоровью, отказ от диспансеризации и профилактики заболеваний. Анализ исследования состояния здоровья машинистов с диагностированной сердечнососудистой патологией подтверждает необходимость совершенствования традиционного подхода к решению данной проблемы.

Целью исследования является определение и минимизация неблагоприятных факторов трудового процесса машинистов метрополитена, отражающих нагрузку на центральную нервную систему, органы чувств и эмоциональную сферу работника.

Материалы и результаты исследования. Специфические условия труда, вредные факторы, воздействующие на машинистов, требуют внимательного отношения к здоровью и эмоциональному состоянию работников. Если воздействие таких вредных производственных факторов, как шум, вибрация, недостаточная освещенность и т.п., не вызывает сомнений в необходимости проведения определенных мероприятий, то профилактике эмоционального выгорания не всегда уделяется достаточное внимание.

Режим труда и отдыха работников метрополитена регулируется приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 16.10.2020 № 423 [2]. Период суммированного учета рабочего времени машинистов составляет три месяца. Продолжительность рабо-

чей недели 36 часов. Персонифицированный график работы каждого машиниста, определяющий место и время начала и окончания, продолжительность смен, должен предварительно составляться на предстоящий месяц и выдаваться в конце текущего месяца. График регламентирует утренние, дневные и вечерние смены, продолжительность которых может быть от 6,5 до 8,5 часов. В течение смены предусмотрены перерыв на обед 40 минут и два технологических перерыва по 11 минут. Если машинист заканчивает смену поздно вечером, он может переночевать в специальной комнате отдыха. На практике нередко машинисты знают свой график только на предстоящие 4-5 дней. Такая ситуация вызывает чувство неопределенности и не позволяет работнику планировать своё личное время отдыха.

Время, выделяемое на сон, зависит от смены, которая может закончиться как в 23.00 в депо, так и на линии в 02.40. По действующим нормативам ночная смена назначается один раз в неделю, но в связи с различными производственными обстоятельствами их количество может быть увеличено до 2-х, а иногда до 3-х ночных смен в неделю. Конечно, во избежание накопления усталости и связанных с ней ошибочных действий, а также отдалённых негативных последствий для здоровья, работа в ночную смену требует составления и выполнения специального графика отдыха [3].

В начале рабочей смены машинисты проходят предрейсовый медицинский осмотр в специально оборудованном на станции медицинском кабинете. Машинисты, как и представители других аналогичных профессий, должны обладать отличным физическим здоровьем и высокой психологической устойчивостью [4-6].

Описанные характерные особенности работы машинистов метрополитена помимо специфических отклонений в состоянии здоровья приводят также к надёжно установленным проявлениям профессионального выгорания. Проблема профессионального выгорания актуальна и широко обсуждается во многих научных работах. В исследованиях таких ученых, как Салогуб А. М., Трущенко М.Н., Камнева Е.В., Неруш Т.Г. проанализированы достижения зарубежных и российских ученых в изучении структуры синдрома эмоционального выгорания на основе не только традиционных подходов, но также, например, в контексте социальной ответственности или системогенетического подхода [7-10]. Структурно-функциональный анализ феномена «эмоциональное выгорание личности» проведен Платоновым Ю.П. [11].

Интересно отметить, что синдром эмоционального выгорания, если говорить о профессии машиниста метрополитена, наблюдается у работников, которые по своим личностным качествам относятся к специально отобранной группе людей, обладающих высокой степенью физической и эмоциональной выносливости и устойчивости к вызывающим его факторам, например, к монотонности производственной

обстановки, акустическим и другим помехам, эмоциональной напряженности, вызванной необходимостью находиться в постоянной готовности к экстренным действиям. Кроме того, работнику необходимы дисциплинированность и решительность. Таким образом, соответствовать профессиональным требованиям надежности и успешно овладеть профессией машиниста способен далеко не каждый физически здоровый человек [12].

Значительное эмоциональное напряжение характерно для деятельности машиниста и связано не только с повышенной ответственностью за безопасность пассажиров, но и с постоянной необходимостью контроля выполнения графика движения и запрещающих сигналов. Постоянное нервно-эмоциональное напряжение является своего рода постоянным рабочим фоном, на котором иногда возникают экстренные стрессовые ситуации, например, при падении на путь предметов или в случае неадекватного поведения людей. Вероятность таких происшествий существует, и машинист метрополитена должен быть к ним подготовлен технически и психологически. Только в этом случае его действия будут гарантированно целесообразными и способствующими минимизации негативных последствий. Осознание вероятности таких происшествий и понимание зависимости в немалой степени исхода ситуации от собственных действий приводит к напряжению и утомлению машиниста [13, 14].

Аварийная ситуация с тяжелыми последствиями или падение человека на путь могут оказать серьезное влияние на психоэмоциональное состояние машиниста, поэтому в таких случаях предусмотрена специальная реабилитация. Организация работы и рабочего места в таких условиях требует особого внимания во избежание неблагоприятных последствий для здоровья и безопасности [15, 16].

В результате проведенного опроса можно сделать вывод, что источниками профессионального стресса машинистов метро являются:

- следование поезда в условиях ограниченной видимости, что требует повышенного внимания для распознавания сигналов, указателей и знаков, нарушение которых может привести к возникновению аварийной ситуации, и в любом случае наказывается штрафом;
- вероятность попадания в нештатные ситуации (наезд на человека, находящегося на путях, возгорание во время следования поезда и т.д.)
- увеличение темпа деятельности и недостаток времени в экстремальных условиях;
- превышение нормативного количества ночных смен;
- некомфортные условия отдыха;
- необходимость выполнять одновременно действия, направленные на решение различных задач;
- большой поток информации, поступающий в ограниченное время;
- недостаток общения с коллегами и обстановка в коллективе.

Исследование психоэмоционального состояния машинистов метрополитена было проведено нами с помощью анкетирования 15 сотрудников метрополитена мужского пола в возрасте от 25 до 40 лет со стажем работы по профессии «машинист» от 3 до 17 лет. Тестирование проводилось с применением методики «Диагностика уровня эмоционального выгорания» и опросника «Шкала AOS» [17].

При анкетировании работникам было предложено ответить на ряд вопросов, касающихся трудовой деятельности, профессиональной подготовки и условий труда. Результаты анкетирования показали, что 73% работников не видит возможности для повышения квалификации, 60% анкетированных не испытывают уверенности в будущем, 80% работников при возможности поменяли бы место работы, 73% работников не удовлетворены оборудованием рабочего места, при этом только 40% анкетированных могут открыто высказать непосредственному руководителю свои идеи и предложения. В целом 73% работников не удовлетворены своей работой, 87% сотрудников не удовлетворены уровнем морального стимулирования и не чувствуют собственной значимости. Все это в конечном итоге приводит к профессиональному выгоранию машинистов электропоездов метрополитена.

Известно, что практическая деятельность человека в соответствии с присущей ему биологической, физиологической и психической активностью направлена на удовлетворение потребностей и реализации определенной цели [18, 19]. Таким образом, каждую конкретную деятельность человека можно представить в виде треугольника. Конечный результат, или успешность деятельности, представляет собой вершину этого треугольника. Основанием для достижения желаемого результата деятельности является наличие мотивации и высокий уровень необходимых для каждой конкретной деятельности профессионально важных качеств (ПВК). То есть для построения треугольника деятельности человека, кроме вершины успешности, необходимы две другие вершины (два столпа).

Успешная деятельность человека возможна при наличии психологической готовности, которая независимо от профессии включает следующие компоненты. Мотивационный компонент – желание успешного выполнения задачи, интерес к деятельности, стремление показать себя с лучшей стороны. Познавательный компонент – понимание обязанностей, оценка значимости задачи, знание средств достижения цели. Эмоциональный компонент – чувство ответственности, уверенность в успехе, воодушевление. Волевой компонент – способность к самоконтролю, сосредоточению на задаче, отвлечению от мешающих воздействий, преодолению сомнений и препятствий [20].

Компоненты психологической деятельности взаимосвязаны и в случае нарушения по каким-либо причинам их равновесия успешная деятельность невозможна. Эмоциональный компонент оказывает существенное влияние на другие компоненты.

Тестирование уровня эмоционального выгорания

показало следующие результаты: 67% работников испытывают чувство усталости, объясняя его постоянными проблемами на работе, и считают, что работа оказывает неблагоприятное влияние на их личную и семейную жизнь, поскольку из-за усталости и напряжения они уделяют своим личным делам меньше внимания, чем необходимо; 87% опрошенных отмечают, что работа приносит им все меньше удовлетворения; 53% анкетированных испытывают излишние отрицательные эмоции из-за того, что не могут спокойно и объективно воспринимать критику руководства. Последнее наблюдение очень важно, поскольку показывает, что при таком психоэмоциональном состоянии работника существенно снижается эффективность руководства из-за обесценивания указаний и вследствие этого снижения исполнительской дисциплины. Безусловно, непосредственный руководитель должен быть осведомлен об эмоциональном состоянии работников и учитывать это обстоятельство при принятии решений и определении режима работы. Следует отметить, что значительная часть причин эмоционального выгорания связана с особенностями работы непосредственного руководителя, чьи профессионализм и соответствующие личностные качества могли бы повлиять на ситуацию [21].

Как известно, синдром эмоционального выгорания характеризуется тремя фазами: «напряжения», «резистенции» и «истощения». Результаты теста показывают наличие у большинства участников тестирования фазы «истощения», при котором наблюдаются снижение общего энергетического тонуса и проблемы в нервной системе. На этой стадии истощения других возможностей эмоциональной защиты появление «выгорания» становится необходимым атрибутом личности.

В процессе тестирования практически все работники отметили, что существенным обстоятельством, влияющим на их психоэмоциональное состояние, является недостаток общения с коллегами, с которыми можно было бы обсудить общие и понятные всем проблемы. Возможность такого общения особенно важна в случае сложных ситуаций в семейной и личной жизни, возникающих на фоне психоэмоциональной напряженности на работе. Кроме того, существенная часть опрошенных отмечала важность комфортных условий в комнатах отдыха и санитарно-технических помещениях, состояние которых иногда может способствовать усилению чувства обесценивания, характерного для синдрома эмоционального выгорания.

Эти замечания опрошенных подтверждают важность не только технических мероприятий, направленных на снижение уровня воздействия вредных производственных факторов, без которых, безусловно, невозможно эффективное решение психоэмоциональных проблем, но и свидетельствуют о значимости для человека возможности психологически комфортного общения, а также бытовых условий отдыха. Неудовлетворенность существующим положением в этой области заставляет человека задумываться о том, ка-

кое место в жизни он занимает, как оценивается его труд и его личность.

При разработке мероприятий по улучшению условий труда и отдыха необходимо учитывать современный уровень потребностей и представлений работников. Экономия на качестве и уровне строительных материалов, сантехники, мебели и отсутствие профессионального подхода к дизайну бытовых помещений может привести к большим потерям из-за недооценки человеческого фактора, и наоборот, внимание к цвету и деталям оформления комнат отдыха, оснащение их качественными и удобными предметами интерьера может вызвать эффект, значительно превосходящий затраты.

По результатам опросника «Шкала AOS», в котором психологические личности делятся на пять групп: реалистов, активных оптимистов, активных пессимистов, пассивных пессимистов и пассивных оптимистов, 60% прошедших тестирование относятся к группе пассивных пессимистов. Следует отметить, что с точки зрения преодоления синдрома эмоционального выгорания это самая сложная группа, представители которой лишены веры в свои силы и в возможность предпринять что-либо для успешного разрешения ситуации. Пассивные пессимисты обычно считают себя жертвой, для них характерна подавленность и мрачное настроение. Из всех возможных стратегий поведения они выбирают уход от решения проблем.

Противоположностью пассивным пессимистам являются активные оптимисты, к которым относятся 33% опрошенных работников. В сложных ситуациях представители этой группы сохраняют бодрость, жизнерадостность и уверенность в своих силах и в благополучном развитии событий. Действительно, высокий уровень энергетического тонуса позволяет им осуществлять проблемно-ориентированные стратегии преодоления стресса.

13% работников по результатам опроса являются реалистами, которые адекватно оценивают ситуацию, свои силы и возможные пути преодоления. Представители этой группы устойчивы к психологическому стрессу и в большинстве случаев удовлетворены существующим положением вещей.

При выполнении профессиональных обязанностей машинист испытывает влияние психоэмоциональной напряженности, которая наряду с другими вредными производственными факторами может вызвать появление профессиональных заболеваний и ухудшение состояния здоровья работника. Необходимость постоянного контроля окружающей обстановки, показаний светофоров, состояния пути и поведения пассажиров при отсутствии возможности короткого перерыва вне установленного графика способствует возникновению синдрома эмоционального выгорания. Ситуация осложняется исключительно искусственным освещением, вибрацией и повышенным уровнем шума, а также постоянной сидячей позой в ограниченном пространстве кабины. Воздействие всех этих вредных факторов приводит к профессиональным заболеваниям.

ям и проблемам со здоровьем, характерным для машинистов: снижению слуха, нарушениям сна, заболеваниям сердечнососудистой и нервной системы.

Заключение. Профессиональное выгорание характерно для разных сфер деятельности. Однако особенно опасным и социально значимым оно становится в случае, когда трудовая деятельность работников связана с обеспечением безопасности. Для предотвращения профессионального выгорания не существует единственного способа, поскольку его возникновение связано с уникальным сочетанием внешних и внутренних аспектов жизни человека. Профессиональное выгорание нельзя игнорировать и для его преодоления в зависимости от стадии необходимо находить подходящие в каждом конкретном случае пути.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Метро настоящего и будущего: технологии безопасности и комфорта / Д. А. Дошатов, А. А. Васильев, К. Е. Г. Козин [и др.] // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2021. – № 2(54). – С. 9-15.
2. Приказ Минтранса РФ «Об утверждении Особенности режима рабочего времени и времени отдыха работников метрополитена» от 16.10.2020 № 423.
3. Бухтияров, И. В. Профессиональный стресс в результате сменного труда как фактор риска нарушения здоровья работников / И. В. Бухтияров, М. Ю. Рубцов, О. И. Юшкова // Анализ риска здоровью. – 2016. – № 3. – С. 110-121.
4. Оценка показателей напряженности труда и факторов, влияющих на утомление у пилотов гражданской авиации по результатам анкетирования / Е. В. Зибарев, И. В. Бухтияров, Е. А. Вальцева, А. В. Токарев // единица труда и промышленная экология. – 2021. – Т. 61. – № 6. – С. 356-364. – DOI 10.31089/1026-9428-2021-61-6-356-364.
5. Чуева, Е. Н. Специфика проявления профессионального стресса у представителей социономических профессий / Е. Н. Чуева // Вестник КРАУНЦ. Гуманитарные науки. – 2012. – № 2(20). – С. 165-174.
6. Оценка функционального состояния организма при нервно-эмоциональном и умственном труде / И. В. Бухтияров, И. В. Иванов, О. И. Юшкова [и др.] // Итоги и перспективы развития медицины труда в первой четверти XXI века : материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 14 марта 2019 года. – Санкт-Петербург: Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова, 2019. – С. 41-45.
7. Салогуб, А. М. Структура и содержание синдрома эмоционального выгорания в исследованиях зарубежных и отечественных ученых / А. М. Салогуб // Молодой ученый. – 2014.
8. Трущенко, М. Н. К вопросу о синдроме выгорания: традиционные подходы исследования и современное состояние проблемы / М. Н. Трущенко // Психология: традиции и инновации : материалы Международной научной конференции, Уфа, 20–23 октября 2012 года. – Уфа: Лето, 2012. – С. 1-8.
9. Камнева, Е.В. Профессиональное «выгорание» служащих в контексте социальной ответственности / Е.В. Камнева // Корпоративная экономика. – 2015. – №4(4) – С. 78-80.
10. Неруш, Т. Г. Современное состояние и перспективы изучения проблемы профессионального выгорания в рамках системогенетического подхода / Т. Г. Неруш, Ю. П. Поваренков // Ярославский педагогический вестник. – 2013. – Т. 2. – № 3. – С. 201-207.
11. Платонов, Ю.П. Феномен эмоционального выгорания личности: структурно-функциональный анализ // Учёные записки Санкт-Петербургского государственного института психологии и социальной работы. 2018. Том 29. № 1. С. 7–13.
12. Котова Е.В. Профилактика синдрома эмоционального выгорания: учебное пособие – Красноярский гос. пед. ун-т им. В.П. Астафьева. Красноярск, 2013.
13. Рукавишников, А. А. Личностные детерминанты и организационные факторы генезиса психического выгорания у педагогов : специальность 19.00.03 «Психология труда, инженерная психология, эргономика», 19.00.05 «Социальная психология» : диссертация на соискание ученой степени кандидата психологических наук / Рукавишников Алексей Александрович. – Ярославль, 2001. – 173 с.
14. Винокур В.А. Методика психологической диагностики профессионального «выгорания» в «помогающих» профессиях // Медицинская психология в России. – 2012. – С. 2-3.
15. Маклаков, А. Г. Особенности переживания психотравмирующей ситуации работниками локомотивных бригад / А. Г. Маклаков, Д. А. Фрейдинова // XXV юбилейные Царско-сельские чтения : Материалы международной научной конференции, Санкт-Петербург, 20–21 апреля 2021 года / Под общей редакцией С. Г. Еремеева. – Санкт-Петербург: Ленинградский государственный университет имени А.С. Пушкина, 2021. – С. 89-93.
16. Степанов, А. Н. Организация рабочего места для обеспечения безопасного труда в экстремальной ситуации / А. Н. Степанов, Е. Ю. Нарусова, В. Г. Стручалин // Актуальные научные проблемы обеспечения пожарной безопасности и охраны труда : Сборник трудов XXX Международной научно-практической конференции , Химки, 19 марта 2020 года. – Химки: Академия гражданской защиты МЧС России, 2020. – С. 86-92.
17. Ильин Е. П. Мотивация и мотивы. – СПб.: Питер, 2006 – С. 508.
18. Ремизова К.А. Социально-психологические факторы развития синдрома эмоционального выгорания у социальных работников // Социально-психологические аспекты практики социальной работы. – 2016. – С. 295 -303.
19. Снижение уровня профессионального выгорания на основе учета личностных особенностей при формировании рабочих групп / Нарусова Е.Ю., Стручалин В.Г., Стрельникова Э.Н., Парулева И.В. // Безопасность труда в промышленности. – 2021 — № 9 — С. 45-49 . – DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9-45-49.
20. Перевод, апробация и первичная психометрическая оценка опросника тревоги на рабочем месте Б. Мушалла и М. Линдена (JAS)/ Н. Г. Гаранян, А. В. Шарапова, М. Г. Сорокова [и др.] // Консультативная психология и психотерапия. – 2020. – Т. 28. – № 4(110). – С. 9-34. – DOI 10.17759/cpp.2020280402.
21. Нарусова, Е. Ю. Определение необходимых личностных качеств руководителя для обеспечения безопасного труда работников / Е. Ю. Нарусова, В. Г. Стручалин, А. Н. Степанов // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 8. – С. 91-95. – DOI 10.24000/0409-2961-2021-8-91-95.

Статья поступила в редакцию 21.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 331.4, 624.9, 004.942

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0035

**ПОЛИГОН «УМНЫЙ ТРУД» КАК ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
ПРОСТРАНСТВО ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИЧНОСТИ БЕЗОПАСНОГО ТИПА ПОВЕДЕНИЯ**

©2021

Гончарук Татьяна Николаевна, старший преподаватель**Субботина Надежда Андреевна**, старший преподаватель**Нам Галина Евгеньевна**, аспирант*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет**(190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4,**e-mails: tatjana.goncharuk@yandex.ru, subbota_91@mail.ru, yamibum@gmail.com)*

Аннотация. Формирование личности безопасного типа поведения всегда было, есть и остаётся приоритетной задачей в подготовке специалистов любой отрасли. Для развития системы обеспечения безопасности труда в строительной отрасли, увеличения производительности труда, снижения социальных издержек и минимизации травматизма на учебной базе Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета построен парк безопасности – «Полигон «Умный труд», инновационная образовательная среда, используемая для формирования у будущих специалистов мотивации на труд, отвечающей требованиям безопасности. Для исключения использования модулей Полигона в качестве просто демонстрационного материала, экспертами проекта разработан методический инструментарий, подобраны формы, методы и приемы обучения, соответствующие инновационной обучающей среде, формирующие личность безопасного типа поведения. Безопасное существование и поведение личности ведет к сохранению психологического здоровья, что позволяет трудиться эффективно и продуктивно. Важную роль в формировании личности безопасного типа поведения играет нормативно-правовая база и несомненным плюсом является внедрение в организации нового стандарта ISO 45003, вышедшего в июне 2021 года и посвященного психологическому здоровью и безопасности на рабочем месте.

Ключевые слова: проект, полигон, инновационная среда обучения, модули интерактивного обучения, «живописное» воспроизведение несчастного случая, безопасная трудовая деятельность, мотив трудовой деятельности, мотив безопасности, условия для получения профессиональной компетенции, единство образовательных программ, формирование личности безопасного типа поведения, психологическое здоровье, охрана труда.

**POLYGON "SMART LABOR" AS A PROFESSIONAL AND EDUCATIONAL SPACE FOR THE
FORMATION OF A SAFE TYPE OF BEHAVIOR PERSONALITY**

©2021

Goncharuk Tatiana Nikolaevna, senior lecturer**Subbotina Nadezhda Andreevna**, senior lecturer**Nam Galina Evgenievna**, postgraduate student*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering**(190005, Russia, Saint Petersburg, Vtoraya Krasnoarmeiskaya street 4,**e-mails: tatjana.goncharuk@yandex.ru, subbota_91@mail.ru, yamibum@gmail.com)*

Abstract. The formation of a person of a safe type of behavior has always been, is and remains a priority task in the training of specialists in any industry. To develop a system for ensuring labor safety in the construction industry, increase labor productivity, reduce social costs and minimize injuries, a safety park was built at the educational base of the St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering – «Polygon «Smart Labor», an innovative educational environment used to motivate future specialists to work that meets safety requirements. To exclude the use of Polygon modules as just a demonstration material, the project experts have developed a methodological toolkit, selected forms, methods and techniques of teaching that correspond to an innovative learning environment, forming a personality of a safe type of behavior. The safe existence and behavior of an individual leads to the preservation of psychological health, which allows one to work efficiently and productively. An important role in the formation of a person of a safe type of behavior is played by the regulatory framework and an undoubted advantage is the introduction in the organization of the new ISO 45003 standard, released in June 2021 and dedicated to psychological health and safety in the workplace.

Keywords: project, landfill, innovative learning environment, interactive learning modules, "picturesque" reproduction of an accident, safe work activity, motive of work activity, motive of safety, conditions for obtaining professional competence, unity of educational programs, formation of a personality of a safe type of behavior, psychological health, labor protection.

Введение. Одно из высказываний великого древнекитайского мыслителя и философа Конфуция гласит: «Я слышу, и я забываю. Я вижу, и я запоминаю. Я делаю, и я понимаю» [1]. Действительно, мы лучше

запоминаем и дольше помним именно те события в жизни, которые сопровождались эмоциональными реакциями. Лучше воспринимаем и быстрее воспроизводим именно ту информацию, которая была получена

зрительно, особенно если ее усвоение сопровождается яркими впечатлениями и осознанными действиями. Эмоционально окрашенный материал также вызывает интерес со стороны слушателей, удерживает их внимание и вовлекает в соучастие.

В одном из прошлых номеров журнала «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего», в своей статье «Методологические подходы к снижению травматизма на строительной площадке по вине человеческого фактора» авторы познакомили читателей с Проектом SAFECON, который направлен на развитие системы обеспечения безопасности труда в строительной отрасли для увеличения производительности труда, снижения социальных издержек и минимизации травматизма. Цель проекта – повысить компетентность в области безопасности труда в строительной отрасли за счет разработки стратегии внедрения обучения технике безопасности труда в физической, интерактивной среде обучения [2-4]. В статье была показана роль Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета в данном проекте, представлен построенный «Полигон «Умный труд» – инновационная образовательная среда для подготовки квалифицированных специалистов. Главными объектами данной среды являются модули интерактивного обучения (МИО) по девяти видам строительных работ. Состоят модули из двух установок, в которых представлено выполнение определенного вида работы в соответствии с требованиями норм безопасности и ситуация, когда они не выполняются (рис. 1). Живописная демонстрация наглядности трагических событий в результате нарушения норм безопасности заложена проектом.



Рисунок 1 – МИО «Сварочные работы»

Следующий этап в реализации проекта – тестовые испытания Полигона. Перед экспертами проекта стоит задача разработать методический инструментарий, подобрать формы, методы и приемы обучения, соответствующие инновационной обучающей среде, которая должна формировать личность безопасного типа поведения.

Безопасность на рабочем месте была, есть и должна оставаться главным ключевым моментом в работе каждого из нас. И зависит она не только от условий, в которых трудится человек, но и от него самого. В силу разных психологических причин человек порой совершает неверные действия, которые могут привести к трагическим событиям: поспешность в работе, пренебрежение правилами безопасности, нарушение технологии выполнения работы, пр. Зачастую это зависит

и от уровня культуры безопасности на производстве. Если мы хотим повысить культуру безопасности труда, а точнее культуру безопасного процесса производства, включая отношение к материальным ценностям (к своему рабочему месту, к инструменту, к материалам и пр.) и духовные ценности (сознательность, ответственность за свой труд и своих подчиненных, дисциплинированность и пр.), то необходимо, во-первых, развивать внутреннюю мотивацию персонала на безопасный труд, и во-вторых, развивать нормативную и законодательную базу в области культуры безопасного поведения.

В данной статье авторы ставят **целью** рассмотрение возможности формирования личности безопасного типа поведения при помощи методик, специально разработанных для новой образовательной среды «Полигон «Умный труд», основанных на анализе силы различных мотивов к выполнению требований безопасности на рабочем месте. Также, целью статьи является изучение нового ISO 45003, как инновации в сфере нормативно-правового регулирования, касающейся психологического здоровья работников.

Материалы и результаты исследования. Исследуя отношение к безопасности будущих специалистов, был проведен опрос студентов старших курсов, обучающихся по направлению подготовки «Строительство», на предмет оценки их потребностей в будущей трудовой деятельности. Выпускники данного направления, в соответствии с образовательными программами могут вести проектно-конструкторскую, организационно-управленческую, инженерно-консультационную, производственно-технологическую и научно-исследовательскую деятельность [5, 6]. Каждый из реализуемых видов деятельности должен быть сопряжен с вопросами безопасности: в проектной документации, в организации строительных работ и процессов, при эксплуатации зданий и сооружений.

В основу опроса легла классификация мотивов трудовой деятельности, предложенная польским психологом Т. Томашевским [7]. Он пришел к выводу, что при изучении мотивов производственного труда проявляются пять основных мотивов: мотив выгоды; мотив безопасности; мотив удобства; мотив удовлетворенности; мотив нивелирования в трудовом коллективе [8]. Анализируя свои потребности, ценностные ориентации в производственной среде важно было определить ведущие мотивы и их силу, что позволяет объяснить поведение человека к выполнению действия.

Сила мотивов, расставленная студентами в оценочной шкале, распределилась следующим образом (рис. 2):

- мотив выгоды, связанный с получением вознаграждения за результаты своего труда [7], в обеих группах, оказался главным. По оценочной шкале не опускался ниже 8 баллов;
- мотив безопасности, проявляющийся в стремлении избежать опасности [7], и мотив удовлетворенности от результатов своего труда [7], также отнесены

студентами к первичным мотивам;

– мотив в стремлении выбора более легкого способа выполнения задания, которое требует меньших энергетических затрат и меньшего психического на-

пряжения и мотив «нивелирования», проявляющийся в стремлении «быть не хуже других» [7], были оценены с разным удельным весом и отнесены ко вторичным мотивам.

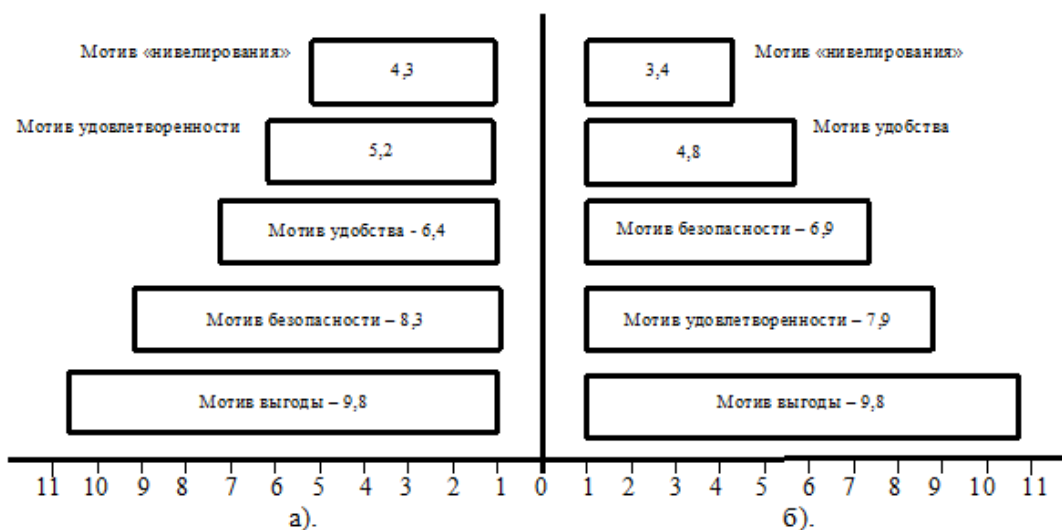


Рисунок 2 – Иерархия силы мотивов в трудовой деятельности студентов:
а) имеющих опыт работы; б) без опыта работы

Самый сильный стимул, движущий человеком – материальный фактор, который превалирует над желанием уберечься от опасности. Нарушение правил безопасного ведения работ не всегда реализует драматичное событие, но предоставляет возможность реализовать мотив выгоды (быстрее сделал – быстрее получил за работу). Такое отношение к работе, с целью экономии времени и сил, ведет к вычленению работ, не влияющих на конечный результат, но обеспечивающих безопасность труда. Со временем работник адаптируется к таким условиям, мотив безопасности при этом ослабевает, а привычка работать в нарушении правил выводит мотив удобства на передний план (я так привык – мне так удобнее). Отдельная группа опрошенных студентов на вторую ступень, после мотива выгоды, ставит мотив удовлетворенности от своей будущей трудовой деятельности, а мотив безопасности отступает на третье место. Деятельность, которая осуществляется не в безопасных условиях труда, когда действия работника не отвечают требованиям его же безопасности, а его физическое и психическое состояние не соответствует норме – все это не может вызывать положительных эмоций и удовлетворение от работы. Студенты, имеющие опыт работы, ставят приоритет безопасности на ключевое место. Были среди них и высказывания о том, что ранжировать эти понятия нельзя.

В вопросах, касательно отношения к безопасности своего труда всегда есть над чем работать. Для формирования у будущих специалистов мотивации на труд, отвечающей требованиям безопасности, на учебной базе Санкт-Петербургского архитектурно-строительного университета построен «Полигон «Умный труд»» – новая физическая образовательная среда, созданы условия обучения, разработаны формы организации

практических занятий.

Формирование профессиональной личности безопасного типа поведения. С ноября 2020 года стартовал третий год проекта SAFECON и направлен он на апробацию программ обучения по охране труда, разработанных в рамках проекта. В ходе испытаний проводятся практические занятия для разных категорий слушателей (студентов высшего и среднего уровня образования, специалистов по охране труда, руководителей организаций и структурных подразделений) по методикам, разработанным специально для новой образовательной среды «Полигон «Умный труд»». Предлагается новый формат практических занятий с погружением в пространство, в котором созданы условия для получения профессиональной компетенции по обеспечению безопасной деятельности. Выделяются три важных аспекта, которые работают в совокупности с целью достижения компетенции.

Мыслительная, поисково-исследовательская и аналитическая деятельность, посредством когнитивной визуализации учебного материала. В ходе самостоятельной работы, расследования конкретного травмоопасного события, путем наблюдения, исследования, обработки визуальной информации обучающиеся:

- изучают, как теоретические вопросы охраны труда могут быть применены в реальных условиях строительного производства;
- исследуют факторы риска, которые являются источником проявления причины риска, приводящего к травмоопасной ситуации;
- расследуют причины травмоопасной ситуации;
- устанавливают характер повреждения здоровья в результате несчастного случая;
- выявляют лиц, виновных в нарушении требований безопасности, устанавливают их вину и ответ-

ственность за нарушение;

- разрабатывают мероприятия, составляющие процедуру управления профессиональными рисками;
- учатся грамотно предоставлять результаты исследований.

«Живописное» воспроизведение несчастного случая с тяжелым или летальным исходом. Трагизм события, представленного в модулях через демонстрацию травм, повреждений человека в результате несчастного случая, летального исхода, заложен проектом. Наблюдая последствия халатного отношения к безопасности труда через реалистичные сцены в модулях, у обучающегося формируется безопасная поведенческая модель, результатом формирования которой является правильное поведение на рабочем месте, уважительное отношение к своей жизни [9, 10].

Единство образовательных программ. Содержащаяся в модулях визуальная информация, касательно организации и технологии выполнения строительно-монтажных работ, требований охраны труда и безопасности труда при выполнении строительно-монтажных работ, связывают знания об объекте (о строительстве), получаемые в рамках разных дисциплин, воедино. Взаимопроникновение содержания дисциплин в каждом модуле способствует осознанию целостности изучаемых материалов и, как следствие, способствует качественному усвоению профессиональных знаний, формированию научного мировоззрения, повышает мотивацию на безопасный труд [11].

Совокупность правильно подобранных форм, методов, средств и приемов обучения при изучении вопросов, касательно безопасности производственных процессов – это сохраненные жизни и здоровья участников производственных процессов, нацеливание их на безопасное поведение и, как результат, комфорт и благополучие на рабочем месте [12]. Но неблагоприятная обстановка на рабочем месте может быть причиной не только физических, но и психических расстройств. За последние несколько десятилетий мир здоровья и безопасности пришел к пониманию того, что защита психологического здоровья сотрудников так же важна, как и защита физического здоровья. В прошлом все проблемы с психологическим здоровьем просто объединялись под термином «стресс». И никто не думал, что работодатели могут это контролировать. Создание безопасной среды, в которой удовлетворяются психологические потребности работников, имеет важное значение, от этого зависят их здоровье и продуктивность.

ISO 45003. Управление психологическим здоровьем на рабочем месте. Признавая, что работодатели несут ответственность за защиту физического и психосоциального здоровья своих сотрудников, международная организация по стандартизации ISO 8 июня 2021 года сообщила [13] о выходе нового стандарта ISO 45003 «Управление охраной труда – Психологическое здоровье и безопасность на рабочем месте – Руководство по управлению психосоциальными рисками». Это

первый стандарт, который дает работодателям практические рекомендации по управлению психосоциальными рисками для персонала на рабочем месте. Основное внимание уделяется аспектам здоровья и безопасности, связанных с «психологическим здоровьем» и «благополучием».

Другими словами, ISO 45003 – это новый глобальный стандарт, который предлагает практические шаги и лучшие методы управления психологическим здоровьем на рабочем месте. Он будет включать правила управления психологическими рисками и включать их в программу здоровья, безопасности и благополучия. Стандарт определяет благополучие на работе как «выполнение физических, умственных и когнитивных функций, потребности и ожидания работника, связанные с его работой». Выполнение можно определить, как «достижение чего-то желаемого, обещанного или предсказанного» [14].

В стандарте рассматриваются многие аспекты, которые могут повлиять на психологическое здоровье работника, включая неэффективное общение, чрезмерное давление, плохое руководство и организационную культуру.

Данный стандарт охватывает такие аспекты, как определение условий, обстоятельств и требований на рабочем месте, которые потенциально могут ухудшить психологическое здоровье и благополучие работников (баланс между работой и личной жизнью, издевательства, домогательства и т. д.); определение первичных факторов риска и их оценка для определения изменений, необходимых для улучшения условий труда; выявление и контроль опасных факторов, связанных с работой, и управление психосоциальными рисками в рамках системы управления охраной труда.

Норма Маккормик (*Norma McCormick*), руководитель проекта технического комитета ИСО, разработавшего стандарт, говорит, что такие стрессовые факторы, как неопределенность, страх, изоляция и изменение рабочей нагрузки, в период пандемии обострились для многих работников, но стандарт касается не только сложившейся в связи с COVID-19 ситуацией. «Каждая организация несет ответственность за гигиену и безопасность труда, и нынешняя пандемия резко подчеркнула ту важную роль, которую на рабочем месте играет психологическое здоровье», – сказала она [13].

Хотя многие чувствуют себя абсолютно бессильными перед последствиями недавних событий, на самом деле есть много вещей, которые можно сделать для повышения стрессоустойчивости персонала и продвижения сильной организационной культуры. Данный стандарт объединяет лучшие международные практики в этой области и подходит для компаний всех типов и размеров.

ISO 45003 также поможет пользователям выполнить требования ISO 45001, первого в мире международного стандарта на систему управления охраной труда и промышленной безопасностью [15-17], которая является основой жизнестойкой организации с

сильной, здоровой и счастливой рабочей силой.

Заключение. Образовательный процесс в вузе, будь то получение профессионального образования, переподготовка или повышение квалификации – это движение к познанию профессии, через усвоение теоретических знаний и постижение практических навыков. Можно разными способами доносить практическую компоненту в подготовке квалифицированных кадров, важно другое – насколько это результативно для формирования будущего специалиста. Проект *SAFECON*, реализованный сегодня, уже показывает эффективность привлекая своей особенностью и вызывая определенные чувства у аудитории. Это разная человеческая реакция на негативно представленные события в модулях. А любая реакция на информацию, будь она позитивной или негативной – это успех к запоминанию. Это уверенность в том, что транслируемые данные, касающиеся выработки безопасного поведения человека в условиях действующих опасностей отложатся в памяти.

Несомненную важность в формировании личности безопасного поведения играет обстановка на рабочем месте, а также психологическое состояние и здоровье работника. Наша трудовая жизнь может оказывать значительное влияние на наше психологическое здоровье, и продолжающаяся пандемия показала, насколько велико может быть это влияние. Идентификация психосоциальных опасностей и оценка риска от возникновения этих опасностей на рабочем месте, наравне с опасностями производственной среды и трудового процесса, позволит формировать целостную картину рабочего места и комплексно разрабатывать мероприятия по управлению рисками на рабочих местах. Понимание природы возникновения и учет психосоциальных рисков согласно ISO 45003 позволит более качественно подходить к формированию личности безопасного поведения, формирование которой, в свою очередь, приведет к снижению травматизма на рабочих местах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Высказывания великого древнекитайского философа и моралиста (551 - 479 до н.э.) Конфуция [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.cecsi.ru/coach/quotes_a_confucius.html (дата обращения 21.09.2021).
2. Гончарук Т.Н., Цаплин В.В. Внедрение МИО в образовательный контент подготовки специалистов в СПбГАСУ // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Безопасность в строительстве» 21–22 ноября 2019 г. / СПбГАСУ. – СПб., 2019. – С. 27–31.
3. Официальный сайт проекта «SAFECON» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://safecon.fi/tu/>. (дата обращения 05.10.2021).
4. Шарова, А. А. Использование интерактивной среды «SAFECON» для обучения специалистов в строительной отрасли / А. А. Шарова // Научный электронный журнал Меридиан. – 2019. – № 16(34). – С. 3–5.
5. Грахов, В.П. Особенности реализации совместных образовательных программ двойных дипломов / Грахов В.П., Мохначев С.А., Исакова Н.В., Кислякова Ю.Г., Симакова У.Ф. // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-10. – С. 2162–2168.
6. Симаков, Н. К. Становление и развитие строительного образования в России (краткий обзор) / Н. К. Симаков, А. А. Юхнина // Фотинские чтения. – 2016. – № 1(5). – С. 31–36.
7. Белоусов Н.С. Психология труда, инженерная психология и эргономика: учебно-методическое пособие – Уральский

государственный педагогический университет, г. Екатеринбург, 2017.

8. Цхадая Н.Д., Подосенова Н.С. Менеджмент безопасности деятельности: учебное пособие – Ухта, УГТУ, 2013.

9. Субботина Н. А. Формирование культуры безопасного труда как одна из важнейших составляющих минимизации травматизма в строительстве // Архитектура – строительство – транспорт: материалы 74-й научной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета. 3–5 октября 2018 г.: [в 2 ч.]. Ч. II. Транспортные и инженерно-экологические системы. Экономика и правовое регулирование в архитектуре и строительстве; СПбГАСУ. – СПб., 2018. – С. 77–80.

10. Шакшак, О. М. Интерактивная цифровая модель как современный метод обучения / О. М. Шакшак, Н. А. Субботина, В. В. Цаплин // Безопасность в строительстве : Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 21–22 ноября 2019 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – С. 32–40.

11. Гончарук, Т. Н. Междисциплинарность – совершенствование качества профессиональных знаний / Т. Н. Гончарук // Педагогические параллели: Материалы VI Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 25 октября – 02 ноября 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – С. 227–229.

12. Дурнев, Р. А. Методические рекомендации по формированию культуры безопасности жизнедеятельности у учащихся и студентов учреждений общего и профессионального образования, работающего и неработающего населения с использованием современных технических средств массовой информации и информационно-телекоммуникационных технологий / Р. А. Дурнев, А. И. Пономарев, Э. Н. Аюбов // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2014. – Т. 4. – № 1(6). – С. 537–576.

13. Сохраняя психическое здоровье на рабочем месте [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.iso.org/ru/news/ref2677.html> (дата обращения 29.09.2021).

14. ISO 45003:2021 Occupational health and safety management – Psychological health and safety at work – Guidelines for managing psychosocial risks.

15. ISO 45001:2018(E) «Occupational health and safety management systems. Requirement with guidance for use».

16. Нам, Г. Е. Возможности информационного моделирования внедренного в систему управления охраной труда / Г. Е. Нам, В. В. Георгиади // Безопасность в строительстве : Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 21–22 ноября 2019 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – С. 233–238.

17. Brian H.W. Guo, Yang Zou, Yihai Fang, Yang Miang Goh, Patrick X.W. Zou. Computer vision technologies for safety science and management in construction: A critical review and future research directions // Safety Science. 2021. Volume 135.

Статья поступила в редакцию 25.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 614.8.027

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0036

ОЦЕНКА РИСКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА РАБОТНИКОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

© 2021

Муллер Нина Васильевна, кандидат технических наук, доцент

Младова Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент

кафедры «Кадастры и техносферная безопасность»

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

(681013, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, e-mail: office@knastu.ru)

Аннотация. Данная работа посвящена методам оценки случаев производственного травматизма и обоснованию мер профилактической направленности по их предотвращению. Исследования динамики и причин производственного травматизма дают возможность целенаправленно разрабатывать меры по их предупреждению на производстве. Эти меры осуществляются как в период проектирования, так и в период строительства и эксплуатации объектов железнодорожного транспорта. В работе использовалась исходная информация по отчетности случаев нарушений, статистике несчастных случаев на производстве, численности и профессиональной деятельности персонала, предварительных и периодических медосмотров работников, об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний за период с 2016 по 2020 годы и преобразована для целей исследования в базы данных. На основе исходной информации, выявлены группы риска персонала по нарушениям и травматизму и проведен их анализ по исследуемым признакам: пол, стаж, возраст, профессия. Проведен расчет и ранжирование персонала по уровню профессионального индивидуального риска по травматизму за 5 лет. Проведен сравнительный анализ полученных рисков. Выявлены группы персонала по факторам (возраст, профессия, пол, стаж) которые склонны к определенным нарушениям разных типов. Построены графики, отражающие взаимосвязь травматизма от факторов и разных типов нарушений. Проведено сопоставление производственного травматизма по предприятию за исследуемый период и сравнен со среднеотраслевыми показателями по виду экономической деятельности с 2016 по 2020 годы, для установления права на скидки к страховым тарифам от несчастных случаев на производстве.

Ключевые слова: производственный травматизм, железная дорога, суперпозиционирование, статистические данные, распределение, риск, несчастный случай, ранжирование, профессиональное заболевание, меры профилактики.

THE ASSESSMENT OF THE RISK OF OCCUPATIONAL INJURIES OF WORKERS ON THE RAILWAY

© 2021

Muller Nina Vasilevna, candidate of technical sciences, associate professor

Mladova Tatiana Aleksandrovna, candidate of technical sciences, associate professor

department "Cadastres and Technosphere Safety"

Komsomolsk-on-Amur State University

(681013, Russia, Khabarovsk Krai, Komsomolsk-on-Amur; Lenin Avenue, 27, e-mail: office@knastu.ru)

Abstract. The research of this thesis is dedicated to the evaluation methods of the industrial injuries on one side and the other to the justification of the preventative measures aiming to reduce industrial injuries. The research of the statistics of industrial injuries and their counter-measures is giving the opportunity to further develop more efficient preventative measures. In the research are being included the measures that are being imposed both during the planning stage of the construction the railway industry objects and during the exploitation of such industrial objects. The research is using the original information from the statistical reports of the accidents on the industrial objects, from the reports of guidance violations on the industrial objects, the personal statistical data of the staff involved into working on the industrial objects and medical insurance statistic. The data is taken from the period of 2016-2020 years and was transformed appropriately for the purposes of the research. According to the data taken for the research we determined the groups of workers that are more likely to commit guidance violations and be involved into the accidents. Their grouping was conducted on the basis of sex, age, stage of working and occupation. Was conducted a ranking analysis of the risk levels among the staff in the last 5 years. Then was conducted a comparative analysis of the risks. As a result of the research were determined the social groups of workers that have inclinations to certain types of violations. Was found and graphically expressed the correlations between different types of guiding violations and different types of accidents. Each industrial object was analyzed in comparison to the average levels of indicators in their industry in the period of 2016-2020 years. The last one was aimed at determining if the object had a right to receive a discount for insuring the workers life from the insurance companies.

Keywords: industrial injuries, railway, superposition, statistical data, distribution, risk, accident, ranking, occupational disease, preventive measures.

Введение. Большинство производственных травм работников на железной дороге обусловлены несоблюдением требований безопасности труда, что в 60% случаев объясняется отсутствием или несоблюдением организационных мероприятий: не проведением или поверхностным проведением инструктажа, небеспеченностью средствами защиты или бесконтрольностью за правильным их использованием и т.д. [17, 21-23].

При изучении связей между психическими и психофизиологическими качествами работающих и случаями возникновения травматизма были обнаружены общие показатели предрасположенности человека к опасностям [10]. К таким относятся: свойства личности (интересы, мотивы, ценностные ориентации); психофизиологические возможности и состояние человека; психические процессы, возникающие при выполнении работы (внимание, память, сенсомоторные процессы).

Для более детального изучения причин травматизма был применен метод суперпозиционирования. Суть метода сводится к тому, что необходимо разбить данные травматизма работников по различным факторам - профессия, пол, возраст, стаж работы. Провести исследование уровня риска травматизма для каждого фактора отдельно и представить результаты в виде графического изображения с последующим послойным наложением полученных графиков.

Целью работы является выявление приоритетных рискоопасных групп работников методом суперпозиционирования для последующей разработки персонализированных мероприятий, направленных на снижение вероятности получения работником травм.

Материалы и результаты исследований. Построив области вероятности попадания работника в травмоопасную зону и проведя их суперпозиционирование, мы можем разделить всех работников на категории опасности травмирования [11, 14]. В данной работе для определения таких категорий в качестве примера рассматривались работники железной дороги.

Для исследования использовалась исходная информация, представленная в виде базы данных за период с 2016 по 2020 годы. Информация формировалась по данным отчетности случаев нарушений трудовой дисциплины, количеству несчастных случаев на производстве, численности и профессиональной деятельности персонала, предварительных и периодических медосмотров работников, данных об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний [4, 7-9].

Анализ несчастных случаев является одним из основных путей борьбы с травматизмом [18-20]. Только после выявления истинных причин несчастного случая появляются возможности для поиска путей исключения или снижения травматизма [13, 15, 16, 20]. В ходе анализа травматизма работников железной дороги было выявлено общее количество, виды и причины несчастных случаев, в том числе смертельных,

профессии пострадавших, их возраст и стаж. Для ознакомления с показателями производственного травматизма на изучаемом объекте рассмотрены журналы регистрации несчастных случаев на производстве, акты Н-1. Численность персонала в среднем превышает 13 тысяч человек. Изучаемый временной период составил 5 лет.

За рассматриваемый период было зафиксировано 145 несчастных случаев, из них несчастных случаев со смертельным исходом – 29.

Основными причинами, приведшими к несчастным случаям на производстве по результатам анализа являются:

- хулиганские действия посторонних – 2%,
- нарушение дисциплины – 1%,
- неисправность состава – 3%,
- нарушение технического процесса - 7%,
- технологическое нарушение – 10%,
- неудовлетворительное содержание сооружений – 3 %,
- недостатки в обучении - 1%,
- нарушение инструкций – 28%,
- личная неосторожность 38%,
- погодные условия - 1%,
- нарушение ПДД – 6%.

Анализ состояния производственного травматизма за отчетный период показывает, что наибольшее количество несчастных случаев на производстве произошло в 2017 году. Такой рост можно связать с тем, что в 2018 году произошло объединение двух подразделений (грузового и коммерческого) в одно, соответственно количество учитываемых травм увеличилось, количество травмированных возросло.

Динамика случаев травматизма по месяцам показал, что на первых местах оказались такие месяцы, как: март, октябрь, ноябрь, декабрь. Наименьшие показатели зафиксированы в июне и августе.

Анализ травматизма по профессиональной деятельности работников позволит выявить, по какому виду из групп: профессия, возраст, стаж, пол произошло наибольшее количество несчастных случаев в абсолютных цифрах. При анализе травматизма по возрастному признаку, выявлено, что самый «травмоопасный» возраст работников – от 46 до 55 лет (49 работников), от 36 до 45 лет (41 работник). Анализ зависимости травматизма от стажа работников за пятилетний период показывает, что самой травмоопасной является категория работников со стажем работы от 1 года до 5-ти лет (46 человек), что говорит о недостатках в их квалификационной подготовке, технической учёбе. Второе место занимает группа персонала со стажем от 5-ти до 10-ти лет (29 человек). В данной группе стажа, работник считает себя уже знающим основные технологические процессы и умеющий работать с ними, что порой недооценивает опасность травматизма. 71% несчастных случаев происходит с мужчинами. Это связано с тем, что в основном производстве заняты главным образом мужчины. Важно отметить, что и среди нарушителей большее количе-

ство – мужчины.

Анализ производственного травматизма, в том числе и выявление групп риска работников проводится в абсолютных показателях, т.е. учитывается лишь абсолютное число произошедших событий, что дает возможность рекомендовать общие мероприятия для снижения травматизма, но для более точного решения проблемы по уменьшению травматизма, необходимы узконаправленные мероприятия.

Поэтому дополнительно рассчитан уровень риска и определены группы риска работников по различным факторам.

Построим диаграмму, отображающую уровень риска производственного травматизма за период с 2016 по 2020 г.г. (рис. 1).

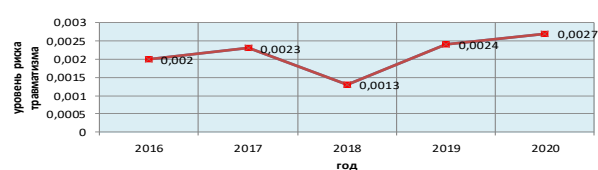


Рисунок 1 – Уровень риска производственного травматизма

Как видно из диаграммы уровень риска в 2016 г. и в 2019 г. находится примерно на одном уровне, а в 2020 г. начинает возрастать. Это связано, прежде всего, с сокращением численности рабочих на предприятии, если в 2017 г. среднесписочная численность была 14010 человек (но важно отметить, что в этот отчетный год возрос уровень несчастных случаев), в 2020 среднесписочная численность составляет 13202 человека.

Рассмотрим динамику общего травматизма в «РЖД» за период с 2016 года по 2020 годы, данные представим в табличной форме. Впоследствии проведем сравнение средневзвешенного риска (R) со среднеотраслевым уровнем риска (R^*) с тем, чтобы решать вопросы о возможном снижении или увеличении ставки страхового взноса (страховой тариф) по обязательному социальному страхованию от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний (табл. 1) [1-6].

Таблица 1 – Динамика травматизма за период с 2016 по 2020 г.г.

Год	2016	2017	2018	2019	2020	Итого
n	30	33	24	30	28	145
N	15282	14010	15015	14570	13202	72079
R	0,0019	0,0023	0,0013	0,0024	0,0025	0,0103
R^*	1,90	2,26	1,27	2,39	2,45	10,27
$R_{срМн} = \sum R^* / m = 10,27 / 5 = 2,05$						

Рассчитаем среднееголетний уровень риска $R_{срМн}$ для выявления в прогнозе статистических закономерностей, основанных на законе больших чисел Бернулли. Эмпирическое среднее (среднее арифметическое) конечной выборки из фиксированного распределения близко к теоретическому среднему (математическому ожиданию) этого распределения. Среднееголетний уровень риска можно использовать в качестве контрольного.

Показатель 2,05 в соответствии с законом больших чисел Бернулли - это величина наиболее вероятно ожидаемого уровня риска, основанная на ретроспективном анализе.

Проведен анализ групп риска персонала «РЖД» по исследуемым признакам: пол, стаж, возраст и профессия. Первоначально определили численность групп на каждый год. Проанализирован риск травматизма по отдельным группам персонала за каждый год. Для каждого распределения рассчитаем средневзвешенный по персоналу риск для всех выделенных групп. Это контрольная проверка результата, т.к. средневзвешенный риск по любому распределению должен быть равен общему риску травматизма на «РЖД» за исследуемый период.

Из полученных данных можно сделать вывод, что основное количество несчастных случаев в «РЖД» происходит с мужчинами, так как они составляют наибольшее количество работающих в данной отрасли. Риск мужского травматизма выше среднееголетнего показателя, но ниже среднеотраслевого показателя.

Наиболее травмированная та часть работающих, у которой стаж работы от 10-ти до 15-ти лет. Это можно объяснить тем, что работник уже привык к выполнению своих обязанностей и часто пренебрегает средствами защиты и соблюдением техники безопасности. Травматизм в данной группе выше среднееголетнего и среднеотраслевого риска. Далее располагается группа со стажем до 1-го года и свыше 15-ти лет. Наименьший показатель риска по стажу (5 место) у группы со стажем от 1 года до 5 лет.

Наиболее травмоопасная возрастная группа 26-35 лет, персонал в возрастной группе уверен в себе и зачастую не способен идентифицировать опасность. На втором месте возрастная категория 18-25 лет - это молодые специалисты, как правило, не имеющие опыта работы. На третьем месте возрастная группа 46-55 лет, т.е. специалисты, имеющие большой опыт работы, и знающие свое дело, но пренебрегающие безопасностью.

Наименее травмоопасен и ниже среднееголетнего и среднеотраслевого риска средний возраст 36-45 лет. Этот возраст характеризуется наибольшей работоспособностью, когда функциональные способности организма наиболее велики (вработываемость, устойчивость к работе, быстрое восстановление после утомительной деятельности), имеется профессионализм в работе, определенные знания в технике безопасности и условиях труда.

Наибольший риск травматизма у профессии: составитель поездов, хотя доля персонала от основной численности меньше чем у дежурного по станции. Риск травматизма по исследуемым специальностям находятся ниже, чем значения среднееголетние и среднеотраслевые.

Применим метод суперпозиционирования с целью выявления закономерности нарушений и риска травматизма.

Прогнозирование персонализированного риска

проводим исходя из предположения, что в будущем у персонала, обладающего соответствующими признаками (профессия, пол, возраст, стаж), риск травматизма будет таким же, как в ретроспективе [24-26]. Фамилии работников закодированы в порядковые номера 0001...0025. Наибольший вклад в формирование индивидуального уровня риска вносят риски по всем факторам, по полу по стажу, по возрасту, по профессии.

Построим диаграмму распределения персонифицированного риска с учетом прогностических коэффициентов (рис. 2).

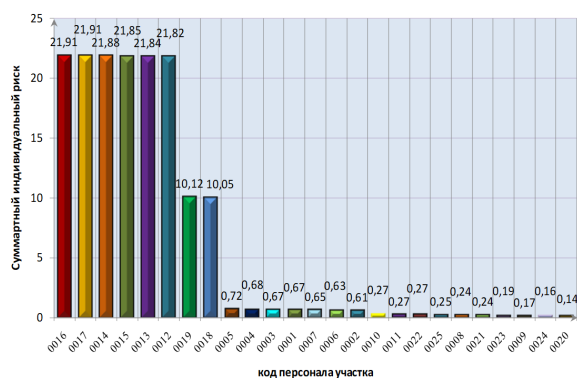


Рисунок 2 – Распределение суммарного индивидуального риска по персоналу с учетом прогностических коэффициентов

Проведен расчет персонифицированного и группового риска травматизма на основе обработки данных методом экспертных оценок [27-29] для нарушений и аналогично произведем расчет для травматизма. Экспертные оценки представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Экспертные оценки значимости вклада в суммарный уровень риска травматизма

Фактор	Экспертная оценка					Относительная экспертная оценка $\alpha_i = X_{i,сп} / S = X_{i,сп} / \sum X_{i,сп}$
	Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3	Эксперт 4	Эксперт 5	
Профессия	10	9	10	8	9	$\alpha_i = 9 / 31 = 0,29$
Стаж	7	9	8	8	10	$\alpha_i = 8 / 31 = 0,26$
Возраст	8	10	9	9	9	$\alpha_i = 9 / 31 = 0,29$
Пол	3	5	5	4	3	$\alpha_i = 5 / 31 = 0,16$
Сумма средних значений	S=31					
Сумма относительных экспертных оценок						1

Были выделены группы примерно равного риска по травматизму (рис. 3).

На кривой распределения в порядке убывания прогнозируемого индивидуального риска, персонал выделен по группам примерно с равным уровнем риска.

В 1 группу (дадим название «особо травмоопасные») вошли работники – составитель поездов. У данных работников выражен риск нарушения при сочетании наивысших показателей в факторе: профессия, возраст и пол. Это наиболее «травмоопасная» группа персонала, требующая повышенного внимания и разработки первоочередных мероприятий по снижению риска травматизма.

Вторая группа тоже относится к наиболее травмоопасным – дежурный по станции.

Риск нарушения выражен по наибольшим значениям фактора в профессии, возраста и пола. Сопоставим полученные группы индивидуального риска по нарушениям и травматизму. Риск нарушения по методике рассчитан на 100 человек, а риск травматизма на 1000 человек. Для сравнения, помножим риск нарушения на 10.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать выводы, что хоть и существует различие по рангам для нарушений и для травматизма, но совпадают ранги для кодов персонала: 0010, 0020. Но для некоторых кодов персонала эти ранги отличаются на одну ступень, так например код персонала 0015 (ранг по нарушениям составляет 3-й, а по травматизму, 4-й). Важно отметить, что первые десять мест у риска нарушения и риска травматизма занимают одни и те же коды персонала. Полученные выявленные группы с примерно равным уровнем риска, будут использованы для разработки мероприятий, по уменьшению риска нарушений, и предотвращению травматизма.

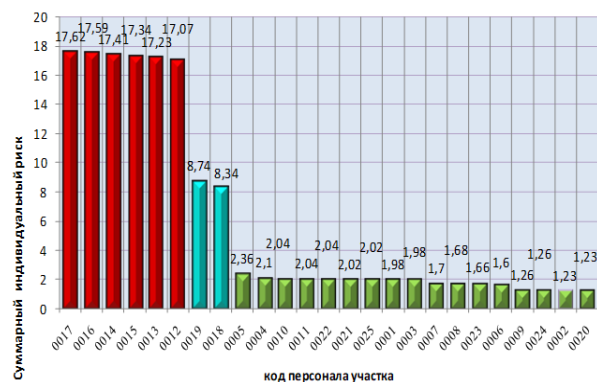


Рисунок 3 – Распределение суммарного индивидуального риска травматизма персонала ОАО «РЖД»

К числу важнейших профилактических мер по предотвращению производственных нарушений относится обучение работников требованиям охраны труда, безопасным приемам работы, строгому соблюдению трудовой дисциплины, технологических инструкций и инструкций по охране труда.

По работе могут быть сделаны следующие **выводы**:

- 1) Проведен анализ травматизма за 2016-2021 гг.
- 2) Произведена количественная оценка случаев травматизма.
- 3) Рассчитаны риски травматизма по факторам за отчетный период 2016-2021 г.
- 4) Весовые коэффициенты не только снижают значения индивидуального риска, но и меняют ранги персонала. Поэтому, не учитывая прогностические коэффициенты нельзя правильно выбрать приоритетные группы персонала для проведения мероприятий по снижению риска.
- 5) Персонифицированный риск травматизма для человека будет изменяться при переходе его из одной группы (по полу, стажу, возрасту, профессии) в другую.
- 6) Произведен расчет подгрупповых показателей

травматизма по типам нарушений за 2016–2020 год, по факторам: пол, возраст, стаж, профессия.

7) Прогнозные оценки риска травматизма и риска нарушений в соответствии с законом больших чисел Бернулли и метода экспертных оценок.

8) Произведен расчет среднемноголетнего уровня травматизма.

9) Выявлены группы риска по травматизму за 5 лет. Произведен их сравнительный анализ.

10) Выделение групп персонала с примерно равным уровнем риска нарушений и травматизма.

11) Даны рекомендации для разработки мероприятий по профилактике и предотвращению нарушений персоналом на основе полученных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 02.08.2020) // «Российская газета», N 256, 31.12.2001.

2. Федеральный закон от 24.07.1998 г. №125-ФЗ «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний» // Собрание законодательства. – 1998. – №31. – Ст. 3803.

3. Федеральный закон от 29.12.2006 г. №255-ФЗ «Об обязательном социальном страховании на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством» // Собрание законодательства. – 2007. ? №1 (часть I). – Ст. 18.

4. Положение об оплате дополнительных расходов на медицинскую, социальную и профессиональную реабилитацию застрахованных лиц, получивших повреждение здоровья вследствие несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний: постановление Правительства РФ от 15.05.2006 г. №286 // Собрание законодательства. – 2006. – №21. – Ст. 2263.

5. Правила установления страхователям скидок и надбавок к страховым тарифам на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний: постановление Правительства РФ от 30.05.2012 №524 // Собрание законодательства. – 2012. – №23. – Ст. 3021.

6. Правила финансового обеспечения в 2011 году предупредительных мер по сокращению производственного травматизма и профессиональных заболеваний работников и санаторно-курортного лечения работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными производственными факторами: приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 11.02.2011 г. №101н // Российская газета. – 2011 г. – №66.

7. Порядок выдачи листков нетрудоспособности: приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 29.06.2011 №624н // Российская газета. – 2011. – №148.

8. Об определении степени тяжести повреждения здоровья при несчастных случаях на производстве: приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 24.02.2005 №160 // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. – 2005. – №16. – С. 149-151.

9. О порядке представления оперативных и аналитических сведений о групповых несчастных случаях с тяжелыми последствиями и иных чрезвычайных происшествиях и о состоянии и причинах производственного травматизма: приказ Федеральной службы по труду и занятости от 21.02.2005 №21 // Документ опубликован не был. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

10. ГОСТ 12.0.002-80. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения. – Взамен 12.0.002-74. – Введ. 1981-01-01. ? М.: Изд-во стандартов, 1981. – 5 с.

11. Аксенов, В.А. Методический подход к анализу и прогнозированию рисков травмирования на рабочих местах в хозяйстве пути / В.А. Аксенов, А.М. Завьялов, Ю.В. Дементьева // Качество и жизнь. – 2018. – № 2 (18). – С. 93-96.

12. Гаранин, М.А. Корреляционное исследование влияния причин несчастных случаев на статистические показатели производственного травматизма / М.А. Гаранин, А.М. Завьялов, Ю.В. Дементьева // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – № 3 (14). – С. 109-120.

13. Глушков, В.А. Проблемы функционирования системы управления профессиональными рисками / В.А. Глушков, А.С. Сальников, Д.А. Гайниева // Вопросы современной науки. – 2017.

14. Дементьева, Ю.В. Ретроспективный прогноз производственного травматизма с учетом степени тяжести здоровья пострадавших / Ю.В. Дементьева, Д.Л. Раенко, А.В. Матфонов // Проблемы безопасности российского общества. – 2017. – № 2. – С. 56-68.

15. Завьялова, Е.С. Эффект от внедрения оценки профессиональных рисков / Е.С. Завьялова // Научное обеспечение реализации государственных программ АПК (Лесниково, 2017): материалы междунар. науч.-практ. конф. – Лесниково: КГУ, 2017. – С. 562-564.

16. Завьялов, А. М. Прогнозирование производственного травматизма на основе множественного регрессионного анализа / А.М. Завьялов, Ю.В. Дементьева, Д.Л. Раенко // Проблемы безопасности российского общества. – 2017. – № 2. – С. 36-50.

17. Завьялов, А.М. Развитие организации контроля за состоянием охраны труда в системе управления охраной труда ОАО «РЖД» / А.М. Завьялов, Ю.В. Дементьева // Наука и образование транспорту (Самара, 19-20 октября 2017 г.): материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. – Самара: СамГУПС, 2017. – С. 59-63.

18. Левашов, С.П. Автоматизированная система оценки рисков профессионального травматизма работников сельскохозяйственного производства / С.П. Левашов // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 6. – С. 58-61.

19. Левашов, С.П. Анализ и разработка критериев оценки и оценивания рисков профессионального травматизма на основе «кодекса лучшей практики» / С.П. Левашов // Анализ риска здоровью. – 2017. – № 2. – С. 37-46.

20. Руководство для работодателей «Семь «золотых правил» производства с нулевым травматизмом и с безопасными условиями труда / Международная ассоциация социального обеспечения. – Сингапур: МАСО, 2017. – 20 с.

21. СТО РЖД 15.014-2017 «Система управления охраной труда в ОАО «РЖД» Управление профессиональными рисками. Общие положения». – М.: ОАО «РЖД», 2017. – 20 с.

22. СТО РЖД 15.002-2016 «Система управления охраной труда в ОАО «РЖД». Организация контроля и порядок его проведения». – М.: ОАО «РЖД», 2016. – 48 с.

23. СТО РЖД 15.011-2015 «Система управления охраной труда в ОАО «РЖД». Организация обучения». – М.: ОАО «РЖД», 2015. – 56 с.

24. Тимофеева, С.С. Современные методы оценки профессиональных рисков и их значение в системе управления охраной труда / С.С. Тимофеева // XXI век. Техносферная безопасность. – 2016. – № 1. – С. 14-24.

25. Ульянов, В.А. Оценка уровня технологической безопасности на железнодорожном транспорте / В.А. Ульянов // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 2. – С. 8-15.

26. Ульянов, В.А. Повышение безопасности труда на железнодорожном транспорте на основе снижения негативных воздействий человеческого фактора : дис. ... канд. тех. наук : 05.26.01 / Ульянов Владимир Андреевич. – М., 2013. – 187 с.

27. Хрупачев, А.Г. Разработка структуры и методики расчета показателя социально-экономического ущерба, обусловленного работой в неблагоприятных условиях труда / А.Г. Хрупачев, А.А. Хадарцев, И.А. Кабанов // Вестник медицинских технологий. – 2017. – № 3. – С. 170-185.

28. Щема, Е.А. Методика оценки индивидуального профессионального риска / Е.А. Щема, О.А. Канунникова, В.С. Сердюк // Техносферная безопасность: материалы всерос. науч.-технич. конф. - Омск: ОмИздат, 2017. – С. 41-44.

29. Яковлева, Е.В. О состоянии производственного травматизма в АПК и путях его снижения / Е.В. Яковлева, Е.В. Кулакова // Вестник РГАУ им. П.А. Костычева. – 2017. – № 2 (34). – С. 93-98.

Статья поступила в редакцию 27.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 629.33

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0037

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЗАСЫПАНИЯ ВОДИТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ

© 2021

Богданов Андрей Владимирович, доктор технических наук,
профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности»*Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)*
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: bav-64@mail.ru)**Астафьева Галина Александровна**, аспирант*Южно-Уральский государственный аграрный университет*
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 75, e-mail: 89226330823@mail.ru)

Аннотация. Засыпание водителя в процессе управления автомобилем связано с причинением большого морального и материального ущерба, так как аварии по причине засыпания часто ведут к смертельным травмам и выходу из строя транспортных средств, подлежащих восстановлению. На долю водителей, погибших по причине засыпания, приходится около 30% от всех погибших за рулем операторов мобильных колесных машин. Тем не менее подавляющее большинство автомобилей не имеют каких-либо систем предотвращения засыпания. Поэтому в данной статье предлагается простое и эффективное в эксплуатации устройство, работа которого основана на фиксации и сопоставлении углов поворота рулевого колеса. Для описания работы данного устройства разработана математическая модель, которая позволит создать алгоритм функционирования устройства предотвращения засыпания водителя за рулем и программу для работы процессора. Предложенное устройство для предотвращения засыпания водителя может быть использовано на различных автомобилях и позволит снизить количество аварийных ситуаций на дорогах.

Ключевые слова: засыпание водителя автомобиля, устройство для предотвращения засыпания, профессиональный риск, рулевое колесо, снижение аварийности на дорогах.

DEVICE FOR ANTI-SLOPING THE DRIVER OF THE VEHICLE

© 2021

Bogdanov Andrey Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor of the department of «Life Safety»
South Ural State University

(454080, Russia, Chelyabinsk, Lenin Ave., 76, e-mail: bav-64@mail.ru)

Astafieva Galina Aleksandrovna, postgraduate student*South Ural State Agrarian University*

(454080, Russia, Chelyabinsk, Lenin Ave., 75, e-mail: 89226330823@mail.ru)

Abstract. The driver falling asleep while driving is associated with the infliction of great moral and material damage. The share of drivers who died due to falling asleep accounts for about 30% of all mobile wheeled vehicle operators who died at the wheel. The vast majority of cars do not have any anti-sleep systems. Therefore, this article proposes a simple and effective device in operation, the operation of which is based on fixing and comparing the angles of rotation of the steering wheel. To describe the operation of this device, a mathematical model has been developed that will create an algorithm for the operation of a device to prevent the driver from falling asleep while driving and a program for the processor. The proposed device for preventing the driver from falling asleep can be used on various cars and will reduce the number of accidents on the roads.

Keywords: car driver falling asleep, device for preventing falling asleep, occupational risk, steering wheel, reduction of road accidents.

Введение. Автомобильные перевозки являются неотъемлемой частью практически в любой производственной сфере. Использование автомобильного транспорта связано с возможными аварийными ситуациями на дорогах. При этом водитель автомобиля подвержен определенному профессиональному риску [1-9]. Профессиональный риск зависит от многих факторов, к одним из которых относится засыпание водителя за рулем. Аварии по причине засыпания водителя за рулем, как правило, наносят значительный материальный и моральный ущерб, так как такие аварии обычно происходят на высоких скоростях с выездом на встречную полосу движения или в кювет. Поэтому такие аварии часто ведут к смертельным травмам и выходу из строя транспортных средств, подлежа-

щих восстановлению. Так, на долю водителей, погибших по причине засыпания во процессе управления транспортным средством, приходится около 30% [3]. В перерасчете для грузовых машин, используемых в России, это составляет примерно 150-180 погибших в год [9]. Несмотря на такую неблагоприятную статистику, в настоящее время на подавляющем большинстве эксплуатируемых автомобилей отсутствуют какие-либо системы предотвращения засыпания водителя в процессе управления [10]. Поэтому задача обеспечения колесных машин устройствами по предотвращению засыпания является актуальной.

Основной целью данного исследования является разработка и теоретическое обоснование работы устройства предотвращения засыпания водителя ав-

томобили,

Материалы и результаты исследования. Принцип функционирования предлагаемого устройства заключается в сопоставлении угловых перемещений рулевого колеса, совершаемых водителем в бодрствующем и дремотном состоянии [11]. Дремотное состояние водителя в первую очередь приводит к уменьшению числа подруливаний. Уменьшение числа подруливаний, в свою очередь, приводит к нарушению курсовой устойчивости автомобиля. Поэтому, фиксируя подруливания, можно контролировать состояние водителя. Если оператор колесной машины совершает подруливания за определенный промежуток времени, то считается, что он бодрствует и способен управлять автомобилем. Если подруливания за установленный промежуток времени не совершается, то считается, что оператор находится в состоянии засыпания и не способен реагировать на дорожную обстановку. В этом случае водителя необходимо разбудить, например, звуковым сигналом или другим возможным способом [12-18].

Устройство для предотвращения засыпания.

Предлагаемое устройство для предотвращения засыпания водителя автомобиля (рис. 1) имеет в своем составе датчики угла наклона 4: первый установлен на рулевом колесе 1, второй – на кузове 5 колесной машины. Так же имеются процессор 2 и система пробуждения 3. Система пробуждения включает в себя звуковые сигнализаторы. Элементы устройства соединены проводами питания 6 и электрическим проводом 7, который соединяет датчик скорости движения, имеющийся на автомобиле, с процессором 2. Необходимо отметить, что на данное устройство подана заявка на патент на полезную модель и получено положительное решение.

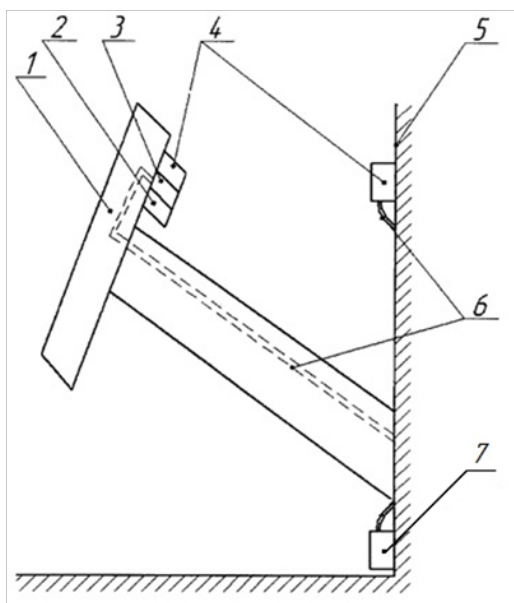


Рисунок 1 – Устройство для предотвращения засыпания водителя за рулем автомобиля: 1 – рулевое колесо; 2 – процессор; 3 – система пробуждения; 4 – датчики угла наклона; 5 – кузов автомобиля; 6 – провода питания; 7 – электрический провод

Датчик скорости автомобиля передает данные о скорости автомобиля в процессор 2 посредством провода 7 (рис. 1). Датчики угла наклона 4 подают данные в процессор 2, эти данные складываются в противофазе и трансформируются в значения угла, на который поворачивается руль. Далее процессор 2 сопоставляет углы поворота рулевого колеса с заданным углом и, при необходимости, если скорость транспортного средства выше нуля, подает сигнал на систему пробуждения 3 по проводам питания 6.

Для описания работы устройства можно воспользоваться структурной схемой, представленной на рисунке 2.

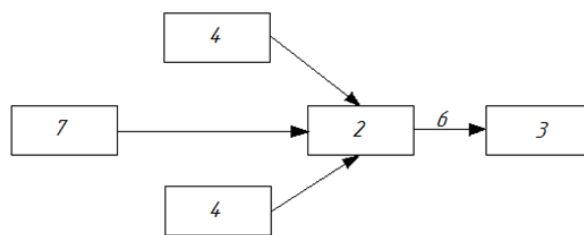


Рисунок 2 – Структурная схема устройства для предотвращения засыпания водителя автомобиля: 1 – рулевое колесо; 2 – процессор; 3 – система пробуждения; 4 – датчики угла наклона; 5 – кузов автомобиля; 6 – провода питания; 7 – электрический провод

Во время движения автомобиля оператор осуществляет подруливания. Для фиксации этих подруливаний устройство снабжено двумя датчиками угла наклона. С имеющегося на автомобиле датчика скорости движения в процессор 2 посредством электрического провода 7 поступает сигнал о скорости движения автомобиля, при этом датчик угла наклона 4, установленный на рулевом колесе 1, фиксирует данные об углах наклона рулевого колеса. Для фильтрации значений углов наклона кузова 5 транспортного средства, которые влияют на положение руля в пространстве, используется датчик угла наклона 4, установленный на кузове 5. Значения углов с обоих датчиков одновременно передаются в процессор 2, в котором складываются в противофазе. В результате процессор пересчитывает их в углы поворота рулевого колеса. Затем процессор сравнивает полученные значения углов с установленным углом. После чего фиксируется только те углы поворота рулевого колеса, которые больше установленного значения (заданного угла). Далее процессор подсчитывает количество углов поворота рулевого колеса за определенный промежуток времени и сравнивает с заданным количеством углов (заданное количество углов поворота руля может равняться единице). Когда водитель начинает засыпать, то количество углов поворота за определенный промежуток времени становится меньше заданного значения (или может быть равным нулю). В этом случае процессор 2 отдает команду системе пробуждения, которая подает звуковой сигнал в кабину автомобиля. Для исключения ложных срабатываний системы пробуждения при остановках транспортного средства, когда водитель может не осуществлять повороты рулевого колеса, но

бодрствовать, в процессор 2 посредством электрического провода 7 поступает сигнал с имеющегося на автомобиле датчика скорости движения о том, что скорость движения автомобиля равна нулю. При этом процессор 2 не подает сигнал на систему пробуждения, и звуковой сигнал не подается.

Для определения одного подруливания бодрствующего водителя были проведены экспериментальные исследования [17, 18]. Они установили, что существует угол поворота руля, который обусловлен внешними факторами $\alpha_{\text{вн}}$ (неровности дороги, ветер и др.) и не зависит от воздействия на руль оператора транспортного средства. Когда оператор осуществляет подруливание, то угол поворота рулевого колеса больше чем авн. Поэтому за одно подруливание можно принять поворот рулевого колеса водителем (угловое перемещение руля), при котором угол поворота рулевого колеса α выше величины $\alpha_{\text{вн}}$ [19]. Это наглядно демонстрирует рисунок 3.

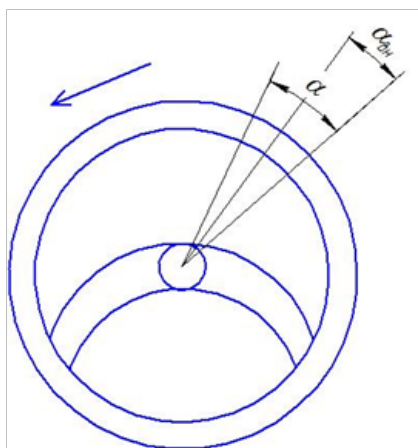


Рисунок 3 – Определение одного подруливания водителем

Из рисунка 3 видно, что в бодрствующем состоянии водитель осуществляет поворот рулевого колеса на больший угол, чем угол поворота руля от внешних воздействий ($\alpha > \alpha_{\text{вн}}$). Данный поворот руля и есть одно подруливание бодрствующим водителем. Поэтому можно считать, что водитель бодрствует, если он совершает хотя бы одно подруливание в определенный промежуток времени. Этот промежуток времени зависит от ходовой части транспортного средства и системы его рулевого управления. Он может быть вычислен расчетно-экспериментальным путем для конкретной марки автомобиля.

Обобщая приведенный материал, для описания работы предлагаемого устройства по предотвращению засыпания водителя автомобиля нами разработана математическая модель.

$$\left[\begin{array}{l} \text{если } \left\{ \begin{array}{l} n_{\text{подр}} = 1 \text{ при } \alpha > \alpha_{\text{вн}}, \text{ то } U = 0 \\ t \leq t_{\text{уст}} \end{array} \right. \\ \text{если } \left\{ \begin{array}{l} n_{\text{подр}} = 0 \text{ при } \alpha \leq \alpha_{\text{вн}}, \text{ то } U > 0 \\ t > t_{\text{уст}} \end{array} \right. \\ \text{если } V = 0, \text{ то } U = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

где $n_{\text{подр}}$ – количество подруливаний, выполняемое водителем;

α – угол поворота рулевого колеса, град;

$\alpha_{\text{вн}}$ – угол поворота рулевого колеса от внешних воздействий, град;

t – время, когда происходит подруливание, с;

$t_{\text{уст}}$ – установленный промежуток времени, в котором водитель должен осуществить подруливание, с;

V – скорость автомобиля, м/с;

U – напряжение питания системы пробуждения, В.

Математическая модель (1) показывает, когда водитель находится в состоянии бодрствования, то он делает одно подруливание ($n_{\text{подр}} = 1$ при $\alpha > \alpha_{\text{вн}}$) за установленный промежуток времени $t_{\text{уст}}$. При этом обеспечивается движение автомобиля по заданной траектории. В этом случае напряжение не поступает на сигнальное устройство для пробуждения ($U = 0$) и оно не срабатывает (звуковой сигнал не подается в кабину автомобиля). При засыпании водителя его реакции на внешнюю среду замедляются, что приводит к уменьшению количества подруливаний. Если подруливание не совершается ($n_{\text{подр}} = 0$ при $\alpha \leq \alpha_{\text{вн}}$) в установленный промежуток времени $t_{\text{уст}}$, то на сигнальное устройство подается напряжение ($U > 0$), и в кабину оператора поступает сигнал, предотвращающий его засыпание. При этом водителю рекомендуется остановить транспортное средство. После соответствующего отдыха водитель может возобновить движение автомобиля. Если оператор колесной машины не реагирует на подаваемые сигналы системы пробуждения, то двигатель может быть заглушен в автоматическом режиме.

При остановке автомобиля, когда его скорость равна нулю ($V = 0$) и водитель может не осуществлять повороты рулевого колеса, но бодрствовать, напряжение на устройство для пробуждения не подается ($U = 0$). Это исключает ложные срабатывания устройства предотвращения засыпания водителя при остановках автомобиля.

Заключение. Полученная математическая модель (1) позволяет разработать алгоритм функционирования устройства предотвращения засыпания водителя за рулем. Данный алгоритм будет являться основой для создания программы для работы процессора устройства. В дальнейшем планируется создание опытной установки для экспериментальных исследований. Для этого проведен анализ конструкции датчиков угла поворота рулевого колеса и выбран наиболее подходящий тип датчика [20]. Предложенное устройство для предотвращения засыпания водителя может быть использовано на различных автомобилях и позволит снизить количество аварийных ситуаций на дорогах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 дек. 2001 г. № 197-ФЗ (ред. от 29.12.2020). URL: <http://docs.cntd.ru/document/901807664> (дата обращения: 7.07.2021).
2. Сидоров А.И., Богданов А.В., Медведева Ю.В., Филиппов А.Н. Определение профессионального риска с помощью методики интегральной оценки условий труда // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 3. — С. 88-93. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-3-88-93
3. Овчаренко М.С. Повышение безопасности операторов

транспортной сельскохозяйственной техники за счет разработки и внедрения инженерно-технических и организационных мероприятий. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. Санкт-Петербург-Пушкин, 2007

4. Волкова, А. О. Усталость водителя и безопасность движения / А. О. Волкова, Е. А. Козырева // Динамика взаимоотношений различных областей науки в современных условиях : сборник статей международной научно-практической конференции: в 3 частях, Казань, 03 мая 2017 года. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2017. – С. 9-12.

5. Якименко, А. В. Утомление как фактор снижения надёжности водителей / А. В. Якименко, Е. А. Козырева // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2016. – Т. 3. – № 3(6). – С. 407-411.

6. Лебединский, А. Г. Повышение безопасности водителей транспортной техники путем снижения аварийности за счет предотвращения возможного засыпания за рулем / А. Г. Лебединский, М. С. Овчаренко // Перспективы науки - 2016 : материалы III Международного заочного конкурса научно-исследовательских работ, Казань, 29 апреля 2016 года. – Казань: ООО «Рокета Союз», 2016. – С. 271-276.

7. Jane C Stutts, Jean W Wilkins, J Scott Osberg, Bradley V Vaughn Driver risk factors for sleep-related crashes // Accident Analysis & Prevention, Volume 35, Issue 3, 2003, pp. 321-331.

8. Fridulv Sagberg Road accidents caused by drivers falling asleep // Accident Analysis & Prevention, Volume 31, Issue 6, 1999. pp. 639-649.

9. Статистические данные ГИБДД по основным показателям состояния безопасности дорожного движения. URL.: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 8.07.2021)

10. Астафьева Г.А. Анализ существующих способов предотвращения засыпания водителя за рулем // Сборник материалов VII международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии», Челябинск, 03–04 октября 2019 года / Редактор: А.И. Сидоров. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – С. 19-25.

11. Патент РФ №2511186 РФ МПК7 В60К 28/02, 28/06. Способ предотвращения засыпания водителя транспортного средства и устройство для его осуществления / А. В. Богданов, С. Ю. Попова; заявитель и патентообладатель Челябинская Гос. агроинженерная академия. – № 2012148343; заявл. 13.11.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. №10

12. Богданов А.В., Попова С.Ю. Способ предотвращения засыпания водителя транспортного средства и устройство его осуществления. В сборнике: ДОСТИЖЕНИЯ НАУКИ - АГРОПРОМЫШЛЕННОМУ ПРОИЗВОДСТВУ МАТЕРИАЛЫ LIV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ; Секция 13. Физика, химия и нанотехнология Секция; 14. Механика и математические методы; Секция 15. Безопасность жизнедеятельности и техническая эксплуатация автотранспорта; Секция 16. Тепловодогазоснабжение сельского хозяйства. Под редакцией П.Г. Свечникова. 2015. С. 115-118.

13. Богданов А.В., Попова С.Ю., Иванов В.Е. Лабораторная установка для определения показателей устройства для предотвращения засыпания водителя за рулем автомобиля // Безопасность жизнедеятельности, № 4, 2017. – С. 30-33.

14. Богданов А.В., Попова С.Ю., Иванов В.Е. Цели и задачи экспериментальных исследований на лабораторной установке для определения параметров функционирования устройства предотвращения засыпания водителя за рулем // Материалы международной научно-практической конференции Института агроинженерии «Сервис технических систем – основа безопасного функционирования машин и оборудования предприятий АПК» – Челябинск: ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 2018. – С. 329-333

15. S. Arimitsu, K. Sasaki, H. Hosaka, M. Itoh, K. Ishida and A. Ito, "Seat Belt Vibration as a Stimulating Device for Awakening Drivers," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 12, no. 5, pp. 511-518, Oct. 2007.

16. R. Kawamura, M. S. Bhuiyan, H. Kawanaka and K. Oguri, "Simultaneous stimuli of vibration and audio for in-vehicle driver activation," 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011, pp. 1710-1715

17. Andrey Bogdanov, Vitaliy Ivanov, Galina Astafeva. Experimental studies in a laboratory installation to determine the parameters of the device prevent the driver from falling asleep while driving // International Conference on Industrial Engineering ICIE 2021: Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020) pp 638-646

18. Богданов А.В., Попова С.Ю., Лакомов А.П., Попов Ю.А. Обоснование работы устройства для предотвращения засыпания водителя автомобиля КАМАЗ-55102. АПК Рос-

сии. 2015. Т. 73. С. 18-31.

19. Богданов А.В., Попова С.Ю., Иванов В.Е., Евдокимов В.С. Исследование курсовой устойчивости машин при засыпании водителя за рулем // Материалы LV международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» / под ред. проф., д-ра с.-х. наук М.Ф. Юдина. – Челябинск: ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 2016. – Ч. IV. – С. 150-156

20. Богданов А.В., Астафьева Г.А., Смирнов М.В. Выбор датчика для устройства предотвращения засыпания водителя за рулем автомобиля // VI Всероссийской студенческой конференции «Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи», Челябинск, 22–23 апреля 2021/ Редактор: А.И. Сидоров. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – С. 15-20.

Статья поступила в редакцию 17.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 614.841.4

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0038

**МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ОГNETУШАЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МОДУЛЬНЫХ УСТАНОВОК
ПОЖАРОТУШЕНИЯ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ
НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА**

© 2021

Пустовалов Илья Андреевич, адъюнкт кафедры
пожарной безопасности технологических процессов и производств
Иванов Алексей Владимирович, кандидат технических наук,
доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств
*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России
(Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149,
e-mails: ilya_pustovalov_2020@bk.ru, spark002@mail.ru)*

Аннотация. В данной статье предложена методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, которая заключается в совершенствовании системы противопожарной защиты за счет снижения времени тушения модельных очагов пожара класса «В». Во введении приведен обзор существующих добавок для изменения характеристик воды. Описано их влияние на тушение пожаров класса «В» в условиях применения тонкораспыленной водой, а также недостатки. Указано, что снижение времени тушения модельных очагов пожара класса «В» было достигнуто путем изменения свойств огнетушащего вещества, применяемого в модульных установках пожаротушения тонкораспыленной водой, которые обеспечивают снижение пожарной опасности технологических процессов и тушение пожаров паров нефтепродуктов на объектах нефтегазового комплекса. Изменение теплофизических и реологических свойств исследуемого огнетушащего вещества обеспечивается благодаря диспергированию в его состав астраленов. Приведены результаты работ отечественных и зарубежных исследователей, которые помогают объяснить влияние астраленов на огнетушащие свойства вещества. Представлены результаты регрессионного анализа влияния свойств огнетушащей жидкости на время тушения модельного очага пожара класса «В». Предложен алгоритм повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой на объектах нефтегазового комплекса. Сделаны выводы о возможности применения разработанной методики и необходимости разработки рекомендаций для применения исследуемых огнетушащих составов в целях их внедрения в ГОСТ.

Ключевые слова: тонкораспыленная вода, астралены, нефтегазовый комплекс, огнетушащая способность, модульные установки, время тушения, система противопожарной защиты.

**METHOD FOR INCREASING THE FIRE EXTINGUISHING EFFICIENCY OF MODULES AUTOMATIC
FIRE WATER MIST SPRAY EXTINGUISHERS SYSTEMS AT THE
OBJECTS OF THE OIL AND GAS FACILITIES**

© 2021

Pustovalov Ilya Andreevich, adjunct at the department of fire safety technological processes and production
Ivanov Alexey Vladimirovich, candidate of technical sciences,
associate professor at the department of fire safety technological processes and production
*Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia
(Russia, 196105, St. Petersburg, Moskovsky prospect, 149
e-mails: ilya_pustovalov_2020@bk.ru, spark002@mail.ru)*

Abstract. This article proposes a technique for increasing the extinguishing efficiency of modules automatic fire water mist spray extinguishers systems, which consists in improving the fire protection system by reducing the time for extinguishing standardized fire source of a petroleum flames. The introduction provides an overview of existing additives for changing water characteristics. Described is their effect on extinguishing standardized fire source of a petroleum flames under conditions of use with water mist, as well as disadvantages. It is indicated that reducing the time for extinguishing standardized fire source of a petroleum flames was achieved by changing the properties of the extinguishing agent used in modules automatic fire water mist spray extinguishers systems. It is reduce the fire hazard of technological processes and extinguish fires of oil vapors at oil and gas facilities. The change in the thermophysical and rheological properties of the investigated fire extinguishing agent is ensured due to the dispersion of astralenes into its composition. The results of the work of domestic and foreign researchers are presented. It is help to explain the effect of astralenes on the fire-extinguishing properties of the substance. The results of a regression analysis of the effect of the properties of the extinguishing agent for the time of extinguishing standardized fire source of a petroleum are presented. An algorithm for increasing the extinguishing efficiency of modules automatic fire water mist spray extinguishers systems at oil and gas facilities is proposed. The conclusion contains information about the possibility of using the developed methodology and the need to develop recommendations for the use of the investigated extinguishing agents in order to introduce them into GOST.

Keywords: water mist, astralenes, oil and gas complex, extinguishing efficiency, modules automatic fire water mist spray extinguishers systems, time for extinguishing, fire protection system.

Введение. В современных условиях наращивания объемов добычи, а также внедрения новых технологий в процессы переработки нефтепродуктов, обеспечение тушения пожаров и защиты людей от воздействия опасных факторов пожара является первоочередной задачей. Сложность применения для этих целей водяных автоматических установок пожаротушения (пп.10, ст. 52 № 123-ФЗ), в том числе модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой (МУПТВ) на объектах нефтегазового комплекса (НГК) связана с особенностями горения нефтепродуктов:

- высокой скоростью окислительных реакций при горении легковоспламеняющихся и горючих жидкостей (ЛВЖ и ГЖ);

- большим сопротивлением восходящих от пламени нагретых газов из-за высокой плотности и теплоемкости пламени.

При реализации мероприятий по обеспечению пожарной безопасности на объектах НГК в условиях применения МУПТВ возникают ограничения, связанные с несоответствием параметров, требуемых для тушения пожара, с заявленными эксплуатационными характеристиками МУПТВ. Основными недостатками являются высокая скорость выхода огнетушащего вещества, низкая интенсивность орошения или недостаточная инерционная способность капель. В целях повышения эффективности тушения пожаров тонкораспыленной водой разрабатываются технические и организационные решения: модернизация оросителей, разработка новых способов и средств тушения, модифицирование огнетушащего состава [1-7]. Выбор приоритетного решения зависит от эффективности, трудоемкости и величины затрат, связанных с его реализацией. Первые два способа требуют значительных экономических затрат, связанных с разработкой технического решения, проведением испытаний, внедрением в производство и переоборудованием существующих установок. В тоже время, модифицирование уже существующего огнетушащего состава способно снизить затраты на улучшение огнетушащих характеристик МУПТВ за счет отсутствия необходимости радикального изменения конструктивных особенностей установки.

В соответствии с таблицей 1, п. 4 ГОСТ Р 53288-2009 в качестве огнетушащих веществ в МУПТВ применяются: вода, газодляная смесь, жидкие ОТВ, а также вода с добавками. В настоящее время для ликвидации пожара класса «В» вода в чистом виде практически не применяется. Среди добавок наиболее распространены поверхностно-активные вещества (ПАВ). Они применяются для изменения свойств воды и повышения её огнетушащей эффективности. Анализ работ зарубежных и отечественных исследователей показал, что для изменения теплофизических и реологических свойств жидкостей в основном применяются поверхностно-активные вещества и многокомпонентные агенты (*Cong B. H., Kim A. K., Wu. B.*), органические растворители (*Koshiba Y., Yamamoto Y.,*

Feng M. H.), наноразмерные оксиды металлов (*Lee J., Kim S.J., Kim T.I., Терехов В.И.*) и углеродные наноструктуры (*Berrada N., Терехов В.И., Liu Z-H, Yang X-F, Gao L., Hone J., Елецкий А.В.*). В таблице 1 представлен перечень добавок к воде, способствующих тушению очагов пожара класса «В» в условиях применения тонкораспыленной воды.

Добавление ПАВ в огнетушащий состав способствуют образованию пленки на поверхности нефтепродукта, которая предотвращает образование паров горючей жидкости. Это повышает эффективность тушения возгораний бензина и дизельного топлива. Механизм применения ПАВ имеет существенный недостаток: при образовании пленки на поверхности нефтепродукта не происходит интенсивного охлаждения зоны горения. Таким образом высокая температура в зоне горения может привести к повторному возгоранию.

Органические растворители повышают кислотность водосодержащего раствора. При этом увеличивается коррозионная активность, негативно влияющая на срок эксплуатации модульной установки пожаротушения.

Основным недостатком металлических наночастиц является значительное повышение электропроводности огнетушащего состава.

Недостатком применения углеродных наноструктур является их склонность к агломерации и быстрая седиментация.

Основная задача, связанная с применением тонкораспыленных струй при тушении пожаров ЛВЖ и ГЖ – обеспечить проникающую способность струи. Проникающая способность жидкости определяется напором струи, напором и гидравлическим сопротивлением отходящих от пламени нагретых газов, размером и скоростью движения капель. При модифицировании огнетушащих составов необходимо учитывать, что доминирующими процессами, определяющими эффект тушения, являются испарение капель воды в газовой фазе, а также на границе раздела фаз [14].

Целью работы является разработка методики повышения огнетушащей способности МУПТВ на основе математического моделирования и экспериментальных данных тушения модельных очагов пожара класса «В» тонкораспыленной огнетушащей суспензией [13]. Применение данной методики позволит обеспечить тушение пожаров и защиту людей от воздействия опасных факторов на объектах НГК в условиях применения МУПТВ.

Материалы и результаты исследования. Способ применения наноструктурированных присадок в качестве модификатора для огнетушащего вещества основан на результатах работ отечественных и зарубежных исследователей.

В исследовании [15] показано, что применение углеродных частиц способствует интенсификации процессов парообразования и испарения капель воды в высокотемпературных газах. Добавление углеродных наноструктур приводят к значительной деформации

капель, движущихся в высокотемпературных газах, что усиливает внутреннюю рециркуляцию. Авторы считают, что при увеличении относительной массовой доли твердых включений до 1,0 об.% скорость испарения капель увеличивается за счет повышения лучистого теплового потока к поверхности «неоднород-

ной» капли. Тепловой поток, поглощаемый частицами углерода, находящимися в тонком пограничном слое нагретой капли в 5–6 раз превышает поток, поглощаемый чистой водой. Поэтому, испарение воды вблизи каждого включения протекает намного быстрее, чем испарение гомогенной жидкости.

Таблица 1 – Эффективность тушения очагов пожара класса «В» тонкораспыленной водой в условиях применения добавок к воде

Горючее вещество	Наименование добавки (концентрация)	Наблюдаемый эффект
[8] Бензин Дизельное топливо Этанол	NaHCO ₃ (5,0 масс.%)	Постепенно повышает эффективность ТРВ, как при возгорании этанола, так и при возгорании углеводородов, но, менее эффективно, чем ПАВ. Существует предел эффективного повышения концентрации металлической добавки из-за предельного давления пара активного соединения металла. Время тушения дизельного топлива составило 59 сек. что на 8 сек. меньше по сравнению с чистой водой (67 сек.). Время тушения бензина составило 108 сек. Время тушения этанола составило 210 сек.
	ПАВ (3,0 об.%)	Небольшое количество ПАВ в составе ТРВ повышает эффективность тушения возгорания бензина и дизельного топлива, образуя тонкую пленку на поверхности. Время тушения дизельного топлива составило 18 сек. Время тушения бензина составило 79 сек. Возгорание этанола ликвидировать не удалось. Чрезмерное добавление ПАВ приводит снижению предельной эффективности состава.
	МС (мульти-компонентная присадка) (3,0 об.%)	Обнаружено комбинированное подавляющее действие ПАВ и металлов. Применима для тушения этанола и углеводородных пожаров, благодаря сочетанию физических и химических механизмов пожаротушения. Время тушения дизельного топлива составило 23 сек. Время тушения бензина составило 80 сек. Время тушения этанола составило 177 сек.
[9] Гептан Дизельное топливо	AFFF (пенообразователь) (1,0-3,0 об.%)	При пожаре на поверхности топлива образуется тонкий слой пены, благодаря чему снижается скорость испарения топлива.
[10] Н-гептан (80 мл.)	C ₇ H ₁₅ OH (7,0 об.%)	Время тушения пожара тестовой смеси составило 3,1 сек.
	C ₇ H ₁₅ OH (3,0 об.%)	Время тушения пожара тестовой смеси составило 1,7 сек.
	C ₄ H ₈ O (1,0-5,0 об.%)	Время тушения гептановой смеси составило 16 секунд. Однако, при концентрации органического растворителя выше 5,0 об.% пожар не удалось ликвидировать.
	CH ₃ CO ₂ CH ₃ (1,0 об.%)	Время тушения пожара тестовой смеси составило 12,2 сек.
[11] Нефть	CH ₃ O(CH ₂) ₂ OCH ₃ (1,0 – 5,0 об.%)	При концентрации 1,0 об.% время тушения составило 4,0 сек. При концентрации 5,0 об.% время тушения составило 5,2 сек.
	KHCO ₃ K ₂ CO ₃	Обнаружено повышение эффективности подавления водяным туманом.
[12] Дизельное топливо	МС (1,0-3,0%)	Оптимальные значения концентрации при тушении дизельного бассейна составляют примерно 3%. Каждый компонент добавки может влиять на механизм пожаротушения ТРВ. Неорганические соли в многокомпонентных добавках усиливают эффекты химического тушения, а фторсодержащие поверхностно-активные вещества физическое пожаротушение.
[13] Бензин АИ-95	Astr. (0,05; 0,25; 0,5; 1,0 об.%)	Применение огнетушащей суспензии с концентрацией Astr. 0,05 об.%, в том числе дистиллированной воды в МУПТВ не привели к тушению модельного очага пожара. При помощи огнетушащей суспензии с концентрацией Astr. 0,25 об.% модельный очаг пожара был потушен в среднем за 3 сек. Наиболее эффективная концентрация астраленов выявлена 0,5 об.%. Среднее время тушения модельного очага пожара данной суспензией составляет 2 сек. Среднее время тушения модельного очага пожара огнетушащей суспензией с наибольшей из предложенных концентрацией астраленов – 1,0 об.% составляет 6 сек. Вероятный механизм тушения пожаров ЛВЖ на объектах НГК огнетушащими суспензиями, модифицируемыми астраленами заключается в: - интенсификации процессов парообразования; - снижении концентрации окислителя в зоне горения за счет контролируемой реакции окисления графеновых слоев наночастиц.

Экспериментальные данные [15] показали, температура на поверхности углеродных частиц на 10-30 К выше, несмотря на более высокую теплопроводность углерода. Полученный результат обусловлен полной прозрачностью воды. Глубокий внутренний нагрев капли происходит за счет лучистой теплопередачи. Скорость нагрева жидкости возрастает с увеличением

диаметра твердых включений.

Исходя из вышесказанного, скорость испарения капли зависит от разности температур между каплей и окружающим пространством с учетом коэффициента теплоотдачи на границе раздела фаз капля-газ. Данный фактор определяется величиной поверхностного натяжения капель жидкости. Известно, что

в зависимости от типа диспергируемых наночастиц в состав воды возможно, как увеличение [16, 17], так и к снижению поверхностного натяжения [18]. Снижение гидрофильности наночастиц [19] вызывает повышенное напряжение в объеме капли за счет воздействия Ван-дер-Ваальсовых сил, которое уменьшает толщину свободной поверхности, что увеличивает поверхностное натяжение наножидкости [20].

В ходе исследований [21] установлено, капли воды с гидрофобными наночастицами, распыленные в потоке высокотемпературных газов, имеют меньший диаметр на выходе из нагретой среды, чем на входе в неё. Степень изменения характерного размера капель зависит от начального диаметра. Так, капли с диаметром от 6 до 10 мм, на выходе уменьшаются в размере не более чем на 5%. В то время, как степень уменьшения размера исходной капли с диаметром до 1 мм увеличивается до 25%. Более того, при среднем диаметре капель более 1 мм обеспечить условия полного их испарения при движении через канал с высокотемпературными продуктами сгорания весьма затруднительно. Экспериментально установлено, что оптимальный размер капель для полного испарения в газовой среде составляет от 150 до 350 мкм. Эти данные согласуются с нормативными значениями размеров капель для определения термина тонкораспыленной воды согласно ГОСТ Р 53288-2009 при проектировании МУПТВ.

В Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России разрабатываются водосодержащие огнетушащие составы [22, 23] на основе углеродных наноструктур, в том числе астраленов [24]. Применение данной суспензии в МУПТВ позволило снизить время тушения модельного очага пожара класса «В». Полученные данные легли в основу методики повышения огнетушащей способности МУПТВ на объектах нефтегазового комплекса.

Разработка методики повышения огнетушащей способности МУПТВ проводилась с учетом оценки основных показателей системы, влияющих на эффективность её применения.

При оценке критической интенсивности тушения пламени нефтепродукта, модифицированным огнетушащим веществом применяли выражение (1):

$$I_{кр}^{-1} = c \cdot m \cdot (T_k - T_t) / r \quad (1)$$

где m – массовая скорость выгорания жидкости, кг/(м²·с⁻¹); T_k – температура кипения жидкости, К; T_t – температура тушения, К; c – удельная теплоемкость горючей жидкости, Дж/К; r – удельная теплота парообразования огнетушащего вещества, Дж/кг [25].

Выражение (2) демонстрирует зависимость критической интенсивности тушения пожара от удельной теплоты парообразования огнетушащего вещества. Результаты, полученные в ходе исследования данной свойства суспензии, позволяют оценить влияние углеродных наноструктур на критическую интенсивность тушения пожара (рис. 1а.). Установлено, что при увеличении концентрации УНС до 0,5 об.% включительно позволяет снизить критическую интенсивность с 0,14 до 0,023 л/(м²·с). Дальнейшее повышение кон-

центрации УНС приводит к увеличению критической интенсивности тушения.

С помощью выражения (2) определяли теоретическое время тушения горючей жидкости МУПТВ:

$$\tau_{туш} = -\frac{4}{3} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho}{c \cdot m^2} \cdot \left[\frac{I_{кр}}{I} + \ln \left(1 - \frac{I_{кр}}{I} \right) \right] \quad (2)$$

где m – массовая скорость выгорания жидкости, кг/(м²·с⁻¹); c , ρ , λ – теплоемкость, плотность, теплопроводность горючей жидкости; I – интенсивность орошения водой поверхности горючей жидкости, л/м²·с; $I_{кр}$ – критическая интенсивность тушения горючей жидкости, л/м²·с [26].

Для сопоставления расчетных и экспериментальных данных времени тушения модельного очага пожара использовались формулы (1) и (2). Исходные данные теплофизических характеристик горючей жидкости и огнетушащих составов принимались в соответствии с исследованием [13].

В ходе расчетов установлено, что теоретическое время тушения в целом соответствует с экспериментальными данными (рис. 1 б).

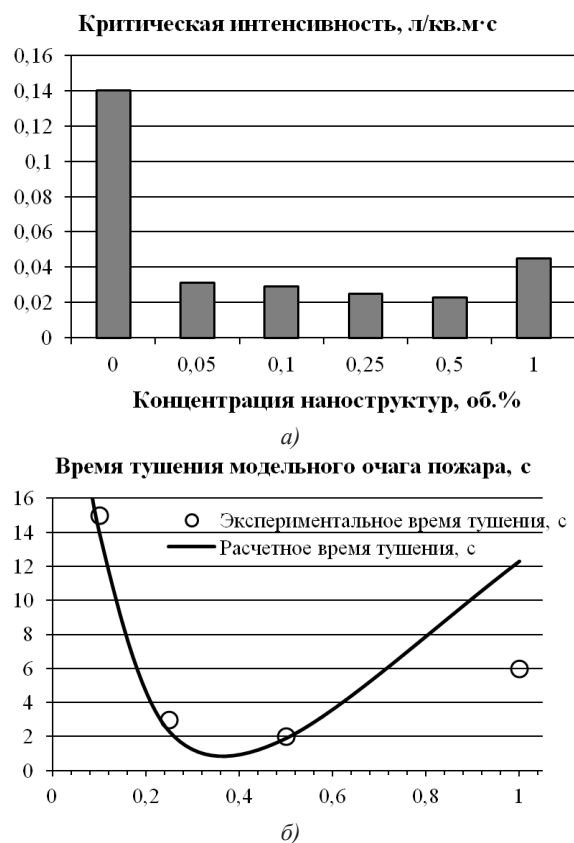


Рисунок 1 – (а) критическая интенсивность тушения огнетушащими суспензиями; (б) сопоставление расчетных и экспериментального времени тушения модельного очага пожара

Прогнозирование параметров наномодифицированных ОТВ осуществлялось посредством установления зависимости результативного признака от множества независимых факторов с помощью множественного регрессионного анализа. Оценивалось влияние свойств огнетушащей жидкости на время тушения модельного очага пожара класса «В» с помощью

программного продукта *STATISTICA Application 10* [27]. Для проведения оценки влияния входных факторов (ВФ) – $X_j \div X_6$, (табл. 2) на выходной параметр (ВП) – время тушения пожара (Y) огнетушащими составами, модифицированными углеродными наноструктурами применялся метод шагового регрессионного анализа – исключение ранее введенного фактора.

Таблица 2 – Характеристика ВФ ($X_j - X_6$) и ВП (Y)

ВП, ВФ	Характеристика (при $t = 20^\circ\text{C}$)	Единицы измерения
X_1	Концентрация углеродных наноструктур	об. %
X_2	Поверхностное натяжение наножидкостей	Н/м
X_3	Плотность наножидкостей	г/см ³
X_4	Динамическая вязкость наножидкостей	Па·с
X_5	Удельная теплота парообразования наножидкостей	кДж/кг
X_6	Скорость нагрева до температуры кипения	$^\circ\text{C}/\text{с}$
Y	Время тушения модельного очага пожара класса «В»	с

Результаты моделирования показали, что независимые переменные X_2, X_3, X_5 являются избыточными. Достоверность полученной модели оценивалась по критерию Фишера $F(3,11) = 69,15$. Данный показатель свидетельствует о том, что полученная модель является достоверной. Коэффициент множественной детерминации: $R^2 = 0,949$. На основе полученных коэффициентов было построено математическое уравнение, предсказывающее значение выходного пара-

метра (3).

$$Y = 596,86 - 42,58 \cdot X_6 + 113,08 \cdot X_1 - 0,239 \cdot X_4 \quad (3)$$

Интерпретация полученных данных указывает, что при увеличении динамической вязкости и скорости нагрева до температуры кипения время тушения модельного очага пожара класса «В» снижается. В свою очередь повышение объемной концентрации астраленов (от 0,5 до 1,0 об.%) приводит к увеличению времени тушения, что подтверждается экспериментальными данными.

Определение огнетушащей способности по ГОСТ Р 53288-2009: способность МУПТВ обеспечивать тушение модельных очагов пожара определенных классов и рангов. На основе полученных результатов, применение огнетушащих суспензий с содержанием астраленов от 0,25 до 1,0 об. % в МУПТВ способно обеспечить тушение модельных очагов пожара класса «В», а также сократить время тушения данных очагов. Оптимальной концентрацией астраленов является 0,5 об. %.

Методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой (рис. 2) путем диспергирования в состав огнетушащего вещества (ОТВ) углеродных наноструктур применима в качестве элемента системы обеспечения пожарной безопасности, как составляющая системы предотвращения пожара (СППЗ).

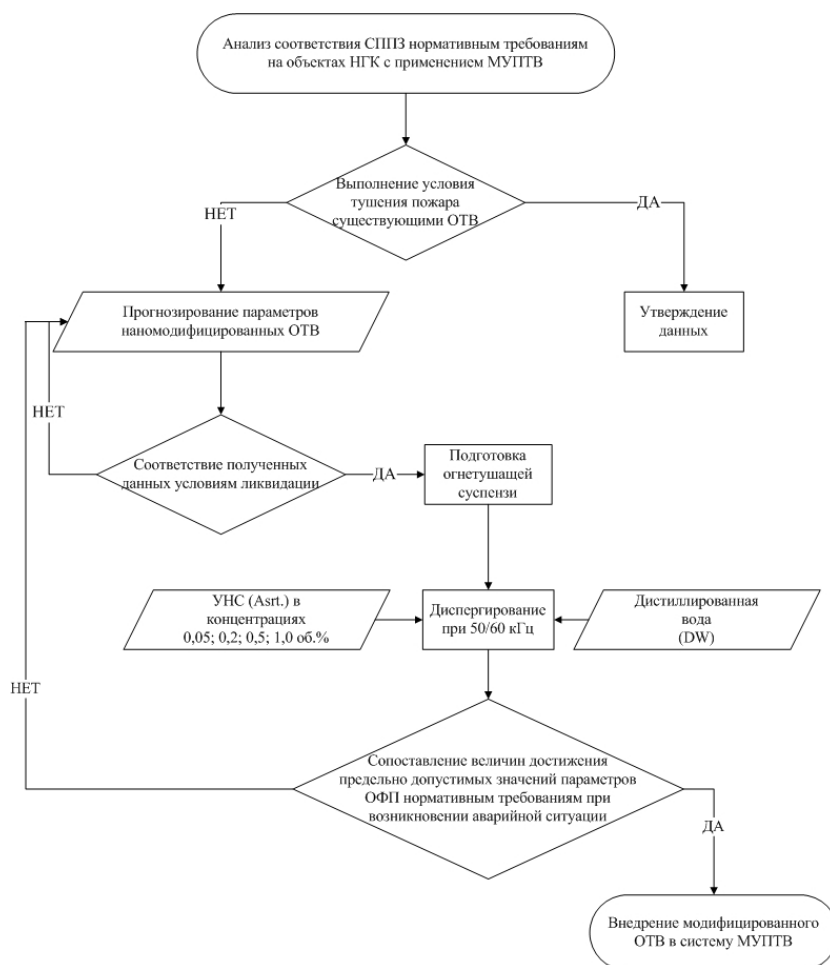


Рисунок 2 – Алгоритм повышения огнетушащей способности МУПТВ на объектах НГК

Заключение. Обзор существующих добавок к воде показал, что они имеют определенные ограничения в условиях применения в МУПТВ. Таким образом, разработан и испытан на модельных очагах пожара класса «В» огнетушащий состав на основе углеродных наноструктур – астраленов. Добавление астраленов в диапазоне концентраций от 0,25 до 0,5 об.% включительно способствуют повышению огнетушащей способности МУПТВ. При повышении концентрации Astr. до 1,0 об.% время тушения модельного очага пожара увеличивается. Вероятно, это связано со склонностью наноструктур при высоких концентрациях образовывать агломерации, которые препятствуют равномерному распределению наноструктур в объеме жидкости.

На основе теоретических, экспериментальных данных и математического моделирования разработана и предложена методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, которая заключается в совершенствовании системы противопожарной защиты за счет снижения времени тушения модельных очагов пожара класса «В». Реализация принципов управления свойствами наножидкостей [28] позволяет управлять факторами, влияющими на тушение пожаров на объектах НПК.

Для массового внедрения данных составов необходимо разработать СТО и подготовить рекомендации по их применению для включения в ГОСТ Р 53288-2009 с обозначением характеристик, требований и способа приготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Ivanov A., Toropov D., Dali F., Perlin A., Lebedev A., Shidljvsky G. Extinguishing characteristics of water suspensions with carbon nanostructures at extinguishing liquid hydrocarbon fires (oil and gas industry) // Delta. – 2019. – Т. 13. – №. 1. – С. 22-31. DOI: 10.17423/delta.2019.13.1.55
- Ponomarev A. N., Ivanov A. V., Suyasova M. V., Savenkova A. Ye., Pyatin D. V., Voytenok O. V. Investigation of extinguishment process of liquid hydrocarbon flames by aqueous suspensions of astralenes // Fire Technology. – 2021. – Т. 57. – №. 4. – С. 2061-2075. DOI: 10.1007/s10694-021-01094-1.
- Mawhinney J. R., Back G. G. Water mist fire suppression systems // SFPE Handbook of fire protection engineering. – Springer, New York, NY. 2016. Pp. 1587-1645. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_46.
- Shrigondekar H., Chowdhury A., Prabhu S. V. Characterization of a simplex water mist nozzle and its performance in extinguishing liquid pool fire // Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. Vol. 93. Pp. 441-455. DOI: 10.1016/j.exthermfluidsci.2018.01.015.
- Еловский В. С. и др. Улучшение качества огнетушащей среды оросителей тонкораспыленной воды механической обработкой их поверхностей // Технологии технологической безопасности. – 2015. – №. 5. – С. 134-141. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb>.
- Chow W. K., Jiang Z., Li S.F., Han D.L. Improving fire suppression of water mist by chemical additives // Polymer-Plastics Technology and Engineering. – 2007. – Т. 46. – №. 1. – С. 51-60. DOI: 10.1080/03602550600948756
- Man C., Shunbing Z., Litao J.A., Xiaoli W.U. Surfactant-containing water mist suppression pool fire experimental analysis // Procedia Engineering. – 2014. – Т. 84. – С. 558-564. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.468
- Cong B., Liao G. Experimental studies on water mist suppression of liquid fires with and without additives // Journal of fire sciences. – 2009. – Т. 27. – №. 2. – С. 101-123. DOI: 10.1177/0734904108095339
- Kim A. K., Dlugogorski B. Z., Mawhinney J. R. The effect of foam additives on the fire suppression efficiency of water mist // National Fire Laboratory, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa, Canada K1A 0R6. – 1994. – С. 347-357.
- Koshiba Y., Yamamoto Y., Ohtani H. Fire suppression efficiency of water mists containing organic solvents // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2019. – Т. 62. – С. 103973. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103973
- Feng M. H., Tao J.J., Qin J., Fei Q. Extinguishment of

counter-flow diffusion flame by water mist derived from aqueous solutions containing chemical additives // Journal of Fire Sciences. – 2016. – Т. 34. – №. 1. – С. 51-68. DOI: 10.1177/0734904115618220

- Wu B., Liao G. Experimental study on fire extinguishing of water mist with a newly prepared multi-component additive // Procedia Engineering. – 2013. – Т. 62. – С. 317-323. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.070
- Пустовалов И.А. Экспериментальное исследование огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, модифицированной астраленами // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 84–96. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.84-96
- Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей // М.: Пожнаука. – 2007. – Т. 268. – С. 505.
- Volkov R. S., Piskunov M.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Water droplet with carbon particles moving through high-temperature gases // Journal of Heat Transfer. – 2016. – Т. 138. – №. 1. – P.5. DOI: 10.1115/1.4031075
- Xue H. S., Fan J.R., Hu Y.C., Hong R.H., Cen K.F. The interface effect of carbon nanotube suspension on the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon // Journal of applied physics. – 2006. – Т. 100. – №. 10. – С. 104909. DOI: 10.1063/1.2357705
- Tanvir S., Qiao L. Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials // Nanoscale research letters. – 2012. – Т. 7. – №. 1. – С. 1-10. DOI: 10.1186/1556-276X-7-226.
- Berrada N., Hamze S., Desforges A., Ghanbaja J. Surface tension of functionalized MWCNT-based nanofluids in water and commercial propylene-glycol mixture // Journal of Molecular Liquids. – 2019. – Т. 293. – С. 111473. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111473
- Quan X., Wang D., Cheng P. An experimental investigation on wettability effects of nanoparticles in pool boiling of a nanofluid // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Т. 108. – С. 32-40. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.098
- Lu G., Duan Y. Y., Wang X. D. Surface tension, viscosity, and rheology of water-based nanofluids: a microscopic interpretation on the molecular level // Journal of nanoparticle research. – 2014. – Т. 16. – №. 9. – С. 1-11. DOI: 10.1007/s11051-014-2564-2.
- Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Испарение одиночных капель и потока распыленной жидкости при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52. – №. 4. – С. 597-604. DOI: 10.7868/S0040364414030181
- Иванов А. В., Торопов Д.П., Ивахнюк Г.К., Федоров А.В., Кузьмин А.А. Исследование огнетушащих свойств воды и гидрогелей с углеродными наноструктурами при ликвидации горения нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. №. 8. С. 31-44. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-ognetushaschih-svoystv-vody-i-gidrogeley-s-uglerodnymi-nanostrukturami-pri-likvidatsii-goreniya-nefteproduktov>
- Иванов А.В., Торопов Д.В., Медведева Л.В., Калинина Е.С. Физический механизм и способ тушения жидких углеводородов модифицированными суспензиями воды с углеродными наноструктурами // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Т. 28. №. 1. С. 22-34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.22-34.
- Shames A. I., Katz E. A., Panich A. M., Mogilyansky D., Mogilko E., Grinblat J., Belousov V.P., Belousova I. M., Ponomarev A. N. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles // Diamond and Related Materials. 2009. Vol. 8. No. 2-3. Pp. 505-510. DOI: 10.1016/j.diamond.2008.10.056.
- Хасанов И. Р., Думилин А. И. Тушение горючих жидкостей распыленной водой // Актуальные проблемы пожарной безопасности: Материалы XXVIII международной научно-практической конференции: в 2 частях. Международный салон средств обеспечения безопасности: «Комплексная безопасность». 2016. С. 363-366. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28817900>.
- Думилин А. И. Параметры тушения пламени горючих жидкостей распыленной водой // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22. – №. 4. – С. 85-90. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/parametry-tusheniya-plameni-goryuchih-zhidkostey-raspylennoy-vodoy>
- Яковлев В.Б. Регрессионный анализ. Расчеты в Excel и Statistica : учебное пособие / В.Б. Яковлев. – Москва : РУСАЙНС, 2018. – 178 с.
- Ivanov A. V. Nanostructures management technology to reduce the fire risk in the oil and gas industry: Performance, features and implementation / A. V. Ivanov, F. A. Dali, G.K. Ivakhnyuk, I. L. Skripnick, M.A. Simonova, D. V. Shikhalev // Journal of Applied Engineering Science. – 2021. – Т. 19. – №. 1. – С. 84-91. DOI: 10.5937/jaes0-26622.

Статья поступила в редакцию 19.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 331.4(075.32)

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0039

**ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА ПРИ УКЛАДКЕ
НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД**

© 2021

Донцов Сергей Александрович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Управление безопасностью в техносфере»

Российский университет транспорта (МИИТ)

(127994, Россия, Москва, ул. Образцова д.9 стр. 9, e-mail: sdonzov@rambler.ru)

Аннотация. Изучена сфера дорожного строительства, имеющая высокую долю работников, занятых во вредных и (или) опасных условиях труда, а также значительное разнообразие применяющихся строительных материалов, техники и технологии. По результатам проведенного аудита безопасности выявлены приоритетные опасные и вредные производственные факторы, и профессии, испытывающие отрицательное воздействие на здоровье и работоспособность. Установлено, что наиболее характерными видами воздействия являются: ингаляционные (пыли и ароматические углеводороды); виброакустические (повышенный уровень шума и вибраций) и психофизиологические (тяжесть и напряженность труда). Выполнены натурные исследования опасности воздействия используемых материалов и технологии, установлено, что использование «холодной» технологии укладки является предпочтительнее. Разработан методический подход и выполнена интегральная оценка условий труда работников дорожного хозяйства при создании дорожных одежд с применением различной технологии укладки («горячей», «холодной») и типов асфальтобетонных смесей (мелкозернистая, песчаная). Предложенный интегральный показатель условий труда позволяет оценивать весь спектр возможных отрицательных воздействий, характеризуется простотой и корректностью оценки и учета, а в изменившихся условиях санитарного законодательства может быть использован при разработке программы и/или проведении производственного контроля работников дорожного строительства в рамках уже существующих процедур.

Ключевые слова: нежесткие дорожные одежды, технология, асфальтобетонные смеси, условия труда, производственный контроль, интегральная оценка.

INTEGRAL ASSESSMENT OF PERSONNEL SAFETY WHEN LAYING NON-RIGID ROADWEAR

© 2021

Dontsov Sergey Alexandrovich, phd, associate professor, department of safety management in the technosphere
Russian University of Transport (MIIT)

(127994, Russia, Moscow, Obraztsova St. 9 p. 9, e-mail: sdonzov@rambler.ru)

Abstract. The field of road construction has been studied, which has a high proportion of workers employed in harmful and (or) hazardous working conditions, as well as a significant variety of used building materials, equipment and technologies. Based on the results of the safety audit, priority hazardous and harmful production factors and professions that have a negative impact on health and performance have been identified. It was found that the most typical types of exposure are: inhalation (dust and aromatic hydrocarbons); vibroacoustic (increased level of noise and vibration) and psychophysiological (severity and intensity of labor). Full-scale studies of the danger of the impact of the materials and technologies used have been carried out, it has been established that the use of "cold" laying technology is preferable. A methodological approach was developed and an integral assessment of the working conditions of road workers was carried out when creating road pavements using various laying technologies ("hot", "cold") and types of asphalt concrete mixtures (fine-grained, sandy). The proposed integral indicator of working conditions makes it possible to assess the entire range of possible negative impacts, is characterized by simplicity and correctness of assessment and accounting, and in the changed conditions of sanitary legislation, it can be used in developing a program and / or conducting production control of road construction workers within the framework of already existing procedures.

Keywords: non-rigid pavements, technology, asphalt mixes, working conditions, production control, integral assessment.

Введение. Одной из динамично развивающихся отраслей отечественной экономики является отрасль дорожного строительства, однако наряду с позитивным воздействием на экономическое развитие и благосостояние граждан данная сфера имеет достаточно высокую долю работников, занятых во вредных и (или) опасных условиях труда. Так согласно официальной статистики по ОКВЭД в сфере строительства 39,4% работников заняты на работах с вредными и (или) опасными условиями труда; 24,7% – на тяжелых работах и 4,2% на работах, связанных с напряженно-

стью трудового процесса [1-2].

Отличительной чертой сферы дорожного строительства является и значительное разнообразие применяющихся строительных материалов, техники и технологии.

Анализ последних исследований и публикаций. В связи с введением в действие СП 2.2.3670-20 [3] работодатель обязан производить производственный контроль за условиями труда, по результатам которого (при необходимости) разрабатывать и проводить санитарно-противоэпидемические (профилактические)

мероприятия, направленные на предупреждение отравлений, инфекционных и профессиональных заболеваний.

Источниками информации о наличии опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ) на рабочих местах являются результаты: специальной оценки условий труда (СОУТ), лабораторных исследований в рамках федерального контроля, лабораторий работодателя, документация производителя на используемые сырье, материалы, изделия и технику.

Целью настоящего исследования явилось изучение условий труда, выявление специфичных ОВПФ для работников предприятий дорожного строительства, создание методического подхода для интегральной оценки безопасности персонала при укладке нежестких дорожных покрытий с применением различной технологии укладки асфальтобетонных смесей (АБС).

Материалы и результаты исследований. Отраслевые дорожные нормы ДН 218.046-01 [4] к нежестким дорожным одеждам относят одежды со слоями, устроенными из разного вида асфальтобетонов, из материалов и грунтов, укрепленных битумом, цементом, известью, комплексными и другими вяжущими, а также из слабосвязных зернистых материалов.

ГОСТ 9128-2013 [5] определяет АБС как рационально подобранную смесь минеральных материалов (щебня, гравия, песка с минеральным порошком или без него) с битумом, взятых в определенных соотношениях и перемешанных в нагретом состоянии. В свою очередь АБС в зависимости от вязкости используемого битума и температуры при укладке разделяют на:

- горячие,готавливаемые с использованием вязких и жидких нефтяных дорожных битумов и укладываемые с температурой не менее 110°C;
- холодные,готавливаемые с использованием жидких нефтяных дорожных битумов и укладываемые с температурой не менее 5°C.

Проведенный анализ результатов карт СОУТ и профессиональных рисков в рамках действующих процедур [6-9] позволил выявить приоритетные профессии подверженные воздействию ОВПФ - это асфальтобетонщики и дорожные рабочие.

На асфальтобетонщика воздействуют: ароматические углеводороды, пыль щебня (10-70% SiO₂), повышенный уровень шума и вибраций, тяжесть трудового процесса.

При выполнении технологических операций на дорожного рабочего оказывают воздействие ароматические углеводороды, пыль щебня 10-70% SiO₂, повышенный уровень шума и вибраций, тяжесть и напряженность трудового процесса.

С целью проведения санитарно-гигиенической оценки условий труда приоритетных профессий был выполнен натурный эксперимент, включающий непосредственное измерение уровня воздействия вредных и опасных производственных факторов на строительной площадке при использовании различной технологии укладки (горячей, холодной).

На рисунке 1 приведены результаты измерений концентрации аэрозолей преимущественно фиброгенного действия (пыль щебня 10-70% SiO₂) и ароматических углеводородов (фенол, бензол, толуол, ксилол) [10-15].

Полученные данные свидетельствуют о значительном превышении действующих санитарно-гигиенических нормативов по химическому фактору.

Наибольшая ингаляционная нагрузка наблюдается при использовании горячей плотной песчаной АБС типа «Д» марки II, а наименьшая характерна для холодной плотной мелкозернистой типа «Бх», марки II.

С целью изучения виброакустического воздействия на персонал [10-15], задействованный в укладке нежестких дорожных покрытий была проведена экспериментальная оценка уровня шума и вибрации на рабочих местах – таблицы 1-2.

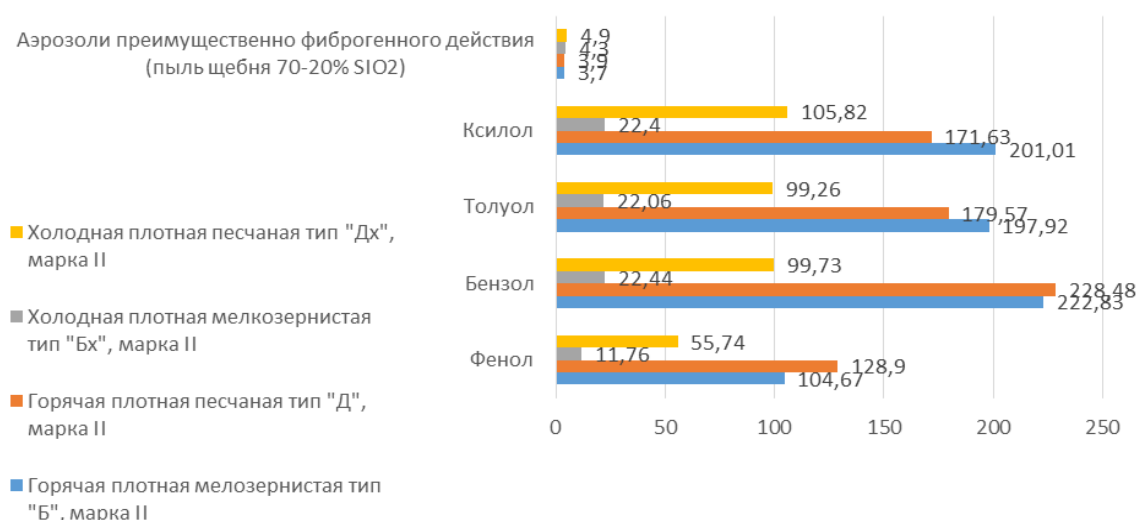


Рисунок 1 – Создаваемые концентрации аэрозолей преимущественно фиброгенного действия и ароматических углеводородов в воздухе рабочей зоне при использовании АБС разных типов и марок

Таблица 1 – Измеренные показатели уровня шума на рабочих местах приоритетных профессий

Рабочее место, профессия	Используемая технология укладки	Эквивалентный уровень звука за операцию и экспозиция (дБА / мин)	Фактическое значение эквивалентного уровня звука, дБА	Нормируемое значение, дБА, согласно СанПин 1.2.3685-21
Дорожный рабочий	Горячая, холодная	75,9 / 384	74,9	80
Асфальтобетонщик	Горячая, холодная	83,6 / 384	82,6	80

Таблица 2 – Измеренные показатели уровня вибрации на рабочих местах приоритетных профессий

Рабочее место, профессия	Используемая технология укладки	Корректированный уровень виброускорения (фактическое значение / экспозиция), дБ / %			Эквивалентный корректированный уровень виброускорения (фактическое значение / нормируемое значение), дБ, СанПин 1.2.3685-21		
		(ось X)	(ось Y)	(ось Z)	ось X	ось Y	ось Z
Дорожный рабочий	Горячая, холодная	121,7	121,5	127,2	117	118	118
		80	80	80	126	126	126
Асфальтобетонщик	Горячая, холодная	117,9	119,2	118,9	121	121	126
		80	80	80	126	126	126

Анализ полученных экспериментальных данных по виброакустической нагрузке показывает, что превышение действующих нормативов имеет место лишь по уровню шуму на рабочем месте асфальтобетонщика.

Для оценки психофизиологических показателей напряженности и тяжести трудового процесса был выполнен аудит безопасности, выявивший превышение существующих санитарно-гигиенических норм [10, 19, 20]. Так, для дорожного рабочего это: подъем и перемещение тяжести постоянно в течение рабочей смены более 15 кг, вынужденные наклоны корпуса за смену составили более 100; плотность звуковых сигналов за один час работы превышает 175, а количество объектов наблюдения составило более 10.

Для асфальтобетонщика это: подъем и перемещение (разовое) тяжести при чередовании с другой работой при ручном перемещении АБС (при невозможности использования асфальтоукладчиков) – более 30 кг; рабочая поза, стоя – более 25% времени; монотонность нагрузок, число элементов или повторяющихся движений свыше 9.

Полученные экспериментальные данные позволили разработать интегральный показатель условий труда приоритетных профессий дорожного строитель-

ства (K), определяемый по формуле:

$$K = \sum_{j=1}^m (\beta \cdot \alpha) / 100\% \quad (1)$$

где β – относительная величина негативного воздействия ОВПФ на работника при использовании различной технологии укладки АБС, определяемая согласно СанПиН 1.2.3685-21 (ингаляционная нагрузка, виброакустические и психофизиологические факторы).

α – коэффициент весомости каждой группы ОВПФ, доли единицы. Для группы показателей ингаляционной нагрузки – 0,5; виброакустических факторов – 0,15 и психофизиологических показателей напряженности и тяжести трудового процесса – 0,35. Числовая характеристика коэффициента определяется по результатам измерения воздействия фактора(ов) на конкретно взятом рабочем месте [9-10, 11-20] методом экспертной оценки, при превышении установленных санитарно-гигиенических норм коэффициент приближается к значению единицы.

Более безопасным (предпочтительным) является вариант $K \leq 0$ [21-22].

Графическая интерпретация интегрального показателя условий труда приоритетных профессий дорожного строительства приведена на рисунке 2.

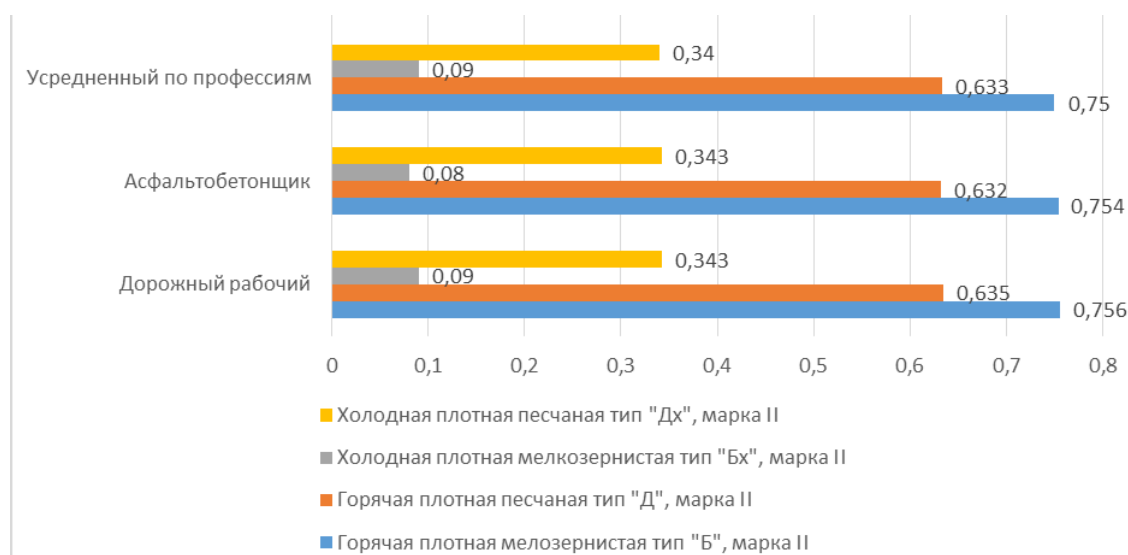


Рисунок 2 – Значения интегрального показателя условий труда при укладке нежестких дорожных одежд с использованием различной технологии укладки АБС

Полученный интегральный показатель условий труда К приоритетных профессий при создании нежестких покрытий составил:

1. При использовании холодной технологии укладки:

– для плотной песчаной тип «Дх» марки II – 0,34 (для дорожных рабочих 0,343; для асфальтобетонщиков 0,343);

– для плотной мелкозернистой тип «Бх» марки II – 0,09 (для дорожных рабочих 0,09; для асфальтобетонщиков 0,08).

2. При использовании горячей технологии укладки:

– для плотной песчаной тип «Д» марки II – 0,75 (для дорожных рабочих 0,756; для асфальтобетонщиков 0,754);

– для плотной мелкозернистой тип «Б» марки II – 0,633 (для дорожных рабочих 0,635; для асфальтобетонщиков 0,632).

Заключение. Наиболее предпочтительной для безопасности персонала при создании нежестких дорожных покрытий является использование холодной технологии укладки, в частности, мелкозернистой АБС тип «Бх» марки II, а наиболее опасной – горячей (плотной песчаной АБС тип «Д» марки II).

Оценивая условия труда приоритетных профессий работников можно сделать вывод, что уровень профессионального риска, выше у дорожных рабочих.

Выбор конкретной технологии укладки АБС при создании нежестких дорожных покрытий зависит от специфики строящейся дороги (интенсивности движения, создаваемых нагрузок), климатических и региональных особенностей, времени года, метеорологических условий, доступности материалов, немаловажное значение должно отводиться и вопросам охраны и безопасности труда.

Существовавшая и ранее обязанность работодателей по результатам СОУТ осуществлять защитные и профилактические мероприятия получила новый вектор развития в связи с введением в действие СП 2.2.3670-20.

Традиционно предприятия дорожного строительства имеют достаточно мощную лабораторную базу и кадровый потенциал, позволяющий в минимальные сроки разработать (скорректировать) и (или) внедрить номенклатуру, объем и периодичность мероприятий производственного контроля условий труда работников.

Разработанный методический подход для интегральной оценки безопасности персонала сферы дорожного строительства при создании нежестких дорожных одежд с использованием различной технологии укладки АБС позволяет в рамках уже существующих процедур СОУТ и производственного контроля условий труда использовать более безопасные материалы, сырье и технологии, снижая тем самым уровень профессионального риска работников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Сайт Федеральной службы по труду и занятости РФ. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.rostrud.ru/>.
2. Российский статистический ежегодник. 2020: Стат. сб. / Росстат. - Р76 М., 2020 – 587 с.
3. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 02.12.2020 N 40 "Об утверждении санитарных правил СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда» (Зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2020 N 61893).
4. ДН 218.046-01 Отраслевые дорожные нормы. Проектирование нежестких дорожных одежд. Утверждены и введены в действие Распоряжением Государственной службы дорожного хозяйства (Росавтодора) Министерства транспорта Российской Федерации от 20.12.00 N ОС-35-Р.
5. ГОСТ 9128-2013 Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия.
6. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 28.06.2021, с изм. от 06.10.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2021).
7. Федеральный закон «О специальной оценке условий труда» от 28.12.2013 N 426-ФЗ (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2021).
8. Приказ Роструда от 02.06.2014 N 199 «Об утверждении рекомендаций по организации и проведению проверок соблюдения требований Федерального закона от 28 декабря 2013 г. N 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» организациями, уполномоченными на проведение специальной оценки условий труда».
9. МР 2.2.0244-21. 2.2. Гигиена труда. «Методические рекомендации по обеспечению санитарно-эпидемиологических требований к условиям труда. Методические рекомендации» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 17.05.2021) (вместе с «Рекомендациями к условиям труда в зависимости от вида деятельности и особенностей технологических процессов»).
10. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
11. Пыль. Методика измерений массовой концентрации пыли в воздухе рабочей зоны гравиметрическим методом для целей специальной оценки условий труда (МИ АПФД-18.01-2018).
12. Фенол. Методика измерений концентраций фенола с помощью комплекта индикаторных трубок для целей специальной оценки условий труда (МИ ХВ-20.01-2018).
13. Бензол. Методика измерений концентраций бензола с помощью комплекта индикаторных трубок для целей специальной оценки условий труда (МИ ХВ-25.01-2018).
14. Толуол. Методика измерений концентраций толуола с помощью комплекта индикаторных трубок для целей специальной оценки условий труда (МИ ХВ-30.01-2018).
15. Ксилол. Методика измерений концентраций ксилола с помощью комплекта индикаторных трубок для целей специальной оценки условий труда (МИ ХВ-32.01-2018).
16. Эквивалентный уровень звука. Методика измерений эквивалентного уровня звука (параметров шума) для целей специальной оценки условий труда (МИ Ш.ИНТ-02.01-2018).
17. Виброускорение. Методика измерений виброускорения (параметров общей вибрации) для целей специальной оценки условий труда (МИ ОВ.ИНТ-05.01-2018).
18. Виброускорение. Методика измерений виброускорения (параметров локальной вибрации) для целей специальной оценки условий труда (МИ ЛВ.ИНТ-06.01-2018).
19. Методика измерений параметров тяжести трудового процесса для целей специальной оценки условий труда (МИ ТТП.ИНТ-16.01-2018).
20. Методика измерений параметров напряженности трудового процесса для целей специальной оценки условий труда (МИ НТП.ИНТ-17.01-2018).
21. Донцов, С.А. Организация и проведение внутренних аудитов охраны труда на предприятиях машиностроения. Монография / С.А. Донцов, Г.К. Ивахнюк, А.А. Аганов, К.А. Суворов. Под ред. Ивахнюка Г.К. СПб: «Свое издательство», 2019 – 102 с.
22. Донцов, С.А. Стратегия управления безопасностью труда и охраной здоровья персонала / С.А. Донцов, Л.Ф. Дроздова, Г.К. Ивахнюк // Безопасность жизнедеятельности. – М.: «Новые технологии», 2019. – № 3. – С. 3–9.

Статья поступила в редакцию 09.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 614.841.4:62

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0040

СНИЖЕНИЕ ВЕЛИЧИН ПОЖАРНОГО РИСКА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ

© 2021

Мифтахутдинова Александра Артуровна, кандидат технических наук,
научный сотрудник отдела инструментальных методов и технических средств экспертизы пожаров
исследовательского центра экспертизы пожаров научно-исследовательского института перспективных
исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности

Иванов Алексей Владимирович, кандидат технических наук,
доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств

Маслаков Михаил Дмитриевич, доктор технических наук,
профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств
Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России
(196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-кт, д. 149,
e-mails: mif-afto@mail.ru, spark002@mail.ru, mif-afto@mail.ru)

Аннотация. Транспортировка нефтепродуктов неотъемлемая часть нефтегазового комплекса. В настоящий момент системы противопожарной защиты не могут в полной мере обеспечить безопасное функционирование железнодорожного транспорта при перевозке нефтепродуктов. С целью обеспечения соответствия нормативным требованиям пожарной безопасности и, в то же время, использования минимальной модернизации технологии предложен способ снижения пожарного риска при транспортировке нефтепродуктов. При применении технологии стабилизации углеродных наноструктур возможно изменять параметры среды, базовой жидкости, которые обладают характеристиками, влияющими на пожарную опасность веществ и материалов. При внесении «умных материалов» в среду нефтепродуктов возможно управлять параметрами наноструктур, что позволяет в значительной степени снизить пожаровзрывоопасные проявления при обращении нефтепродуктов, в том числе и при их транспортировке. По результатам проведенного исследования показано, что использование технологии стабилизации наноструктур позволит снизить величины поражающих факторов вследствие аварии в среднем на 30%. На основании полученных данных сделан вывод о возможности применения наноматериалов с регулируемыми параметрами в среде нефтепродуктов при их транспортировке в системах противопожарной защиты, в том числе, в качестве присадок.

Ключевые слова: «умные материалы», углеродные наноструктуры, наножидкость, электрофизическое воздействие, стабилизация, транспортировка нефтепродуктов, поражающие факторы, потенциальный пожарный риск, индивидуальны пожарный риск.

REDUCING FIRE RISKS WHEN TRANSPORTING PETROLEUM PRODUCTS

© 2021

Miftakhutdinova Aleksandra Arturovna, candidate of technical sciences, researcher of the department of
instrumental methods and technical means for examination of fire, research center for examination of fire, research
institute for advanced research and innovative technologies in the field of life safety

Ivanov Aleksey Vladimirovich, candidate of technical sciences,
associate professor of the department of fire safety of technological processes and production

Maslakov Mikhail Dmitrievich, doctor of technical sciences,
professor of the department of fire safety of technological processes and production
Saint-Petersburg university of state fire service of EMERCOM of Russia
(196105, St. Petersburg, Moskovsky avenue, 149, e-mails: mif-afto@mail.ru, spark002@mail.ru, mif-afto@mail.ru)

Abstract. Transportation of petroleum products is an integral part of the oil and gas complex. At the moment, fire protection systems cannot fully ensure the safe operation of railway transport when transporting oil products. In order to ensure compliance with the regulatory requirements of fire safety and, at the same time, the use of a minimum modernization of technology, a method is proposed to reduce the calculated values of fire risk when transporting petroleum products. When applying the technology of stabilization of carbon nanostructures, it is possible to change the parameters of the medium, the base fluid, which have characteristics that affect the fire hazard of substances and materials. By introducing “smart materials” into the environment of petroleum products, it is possible to control the parameters of nanostructures, which makes it possible to significantly reduce fire and explosion hazard manifestations during the circulation of petroleum products, including during their transportation. According to the results of the study, it was shown that the use of the technology of stabilization of nanostructures will reduce the magnitude of the damaging factors due to an accident by an average of 30%. Based on the data obtained, it was concluded that it is possible to use nanomaterials with controlled parameters in the environment of petroleum products during their transportation in fire protection systems, including as additives.

Keywords: «smart materials», carbon nanostructures, nanofluid, electrophysical variable frequency-modulated signal, transportation of oil products, damaging factors, potential fire risk, individual fire risk.

Введение. Транспортировка нефтепродуктов является важным сектором нефтегазового комплекса, аварийные ситуации на объектах транспорта нефтепродуктов влекут за собой огромный ущерб. Современные методы снижения пожаровзрывоопасных проявлений обращающихся веществ и материалов, к сожалению, в большей степени направлены на минимизацию последствий, произошедших иницирующих аварийные ситуации, событий. Мероприятия и технические средства, в свою очередь, предназначенные для предотвращения пожаров и взрывов не могут в полной мере обеспечить безопасность протекания технологических процессов [1]. Решение задачи оперативной локализации аварии при железнодорожных перевозках нефтепродуктов, позволит снизить общее количество аварийных ситуаций. Для обеспечения условий стабильной работы технологических процессов и производств на объектах транспортировки нефтепродуктов необходимым является возможность управления параметрами обращающихся веществ и материалов с целью обеспечения безопасной работы персонала, аппаратов и оборудования [2].

Решение данной задачи возможно путем использования инновационных методов снижения проявлений пожарной опасности обращающихся веществ и материалов. Перспективным направлением в данной области является применение углеродных наноконструктивных компонентов, преимуществом которых является обратимое изменение свойств базовых жидкостей [3]. С целью увеличения масштабов производства объекты нефтегазового комплекса также сталкиваются с необходимостью разработки методов и средств, направленных на минимальную модернизацию предприятия и обеспечение соответствия нормативным требованиям пожарной безопасности. Одним из таких методов является введение в среду обращающихся легковоспламеняющихся и горючих жидкостей с управляемыми параметрами в структуре наноматериалов – «умных материалов» [5-7].

Преимуществом использования «умных материалов» является изменение физико-химических свойств веществ и материалов без изменения их химического состава [3, 7, 9]. В то же время, ряд существующих недостатков применения технологий наномодификации нефтепродуктов, а именно неизбежной агрегации и седиментации углеродных наночастиц в их среде, может быть решен путем применения технологии стабилизации наноструктур [6]. Известны работы [10], где показано снижение величин пожарного риска при обращении нефтепродуктов путем оперативного введения и последующей электрофизической стабилизации наноструктурных присадок в среде нефтепродуктов.

Целью данной работы является исследование влияния данных наноструктурных присадок на величины поражающих факторов, значения потенциального и индивидуального пожарного риска вследствие реализации аварийной ситуации при транспортировке нефтепродуктов железнодорожным транспортом.

Материалы и методы исследования. При оценке

масштабов возможных аварийных ситуаций важным является характер иницирующего события и воздействия на потенциально опасный объект, и процесс протекания последующей аварии, сопровождающейся истечением, проливом пожаровзрывоопасного вещества из аппаратов и оборудования, а также образованием газопаровоздушных смесей способных к воспламенению.

В качестве объекта исследования рассматривались железнодорожные составы, состоящие из 32 железнодорожных цистерн модели 15-1547-03, предназначенные для транспортировки светлых нефтепродуктов, характеристики: объем кузова 85,6 м³; степень заполнения цистерны – 0,75 железнодорожный состав в стационарном положении. В исследовании использовались нефтепродукты растворитель (разбавитель) уайт-спирит НЕФРАС-С4-155/200 (ГОСТ 3134-78) и керосин авиационный ТС-1 (ГОСТ 32513-2013), в качестве присадок применялись многослойные углеродные нанотрубки (*MWCNT*) [6, 9], стабилизация осуществлялась путем электрофизического воздействия [11]. Подготовка наножидкостей осуществлялась ультразвуковым диспергированием наноструктур, в состав которых входят *MWCNT*, в базовом нефтепродукте [3]. Стабилизация наночастиц в нефтепродуктах осуществлялась электрофизическим методом, описанным в [12].

Наиболее вероятным сценарием аварии при транспортировке пожароопасных жидкостей выбрана ситуация полного разрушения железнодорожного вагона-цистерны, содержащей пожароопасную жидкость при атмосферном давлении.

Реализация иницирующего события рассматривалась как разгерметизация емкости под давлением близким к атмосферному с последующим истечением жидкости [13]. Развитие аварийной ситуации приведено в виде «дерева событий» на рисунке 1. Значения условных вероятностей переходов аварийной ситуации с одной ветви или с ветви на ветвь логического «дерева событий» определялись по данным [8, 14-16].

Исследование влияния наноструктурной присадки на величины пожарного риска при транспортировке нефтепродуктов осуществлялось путем применения методики снижения пожарной опасности процессов с обращением нефтепродуктов путем стабилизации углеродных наноструктур [6].

Результаты исследования. Результаты расчета условных вероятной поражения человека вследствие реализации аварийной ситуации при модификации и стабилизации УНС в среде нефтепродуктов показывают снижение условной вероятности поражения человека волной давления в среднем на 10% (рис. 2).

На процессы парообразования модифицированных нефтепродуктов в условиях стабилизации наноструктур влияют характеризующие параметры наноматериалов [9, 19, 20]. При добавлении наноструктурных присадок и стабилизации полученных наножидкостей интенсивность испарения нефтепродуктов будет снижаться [10].

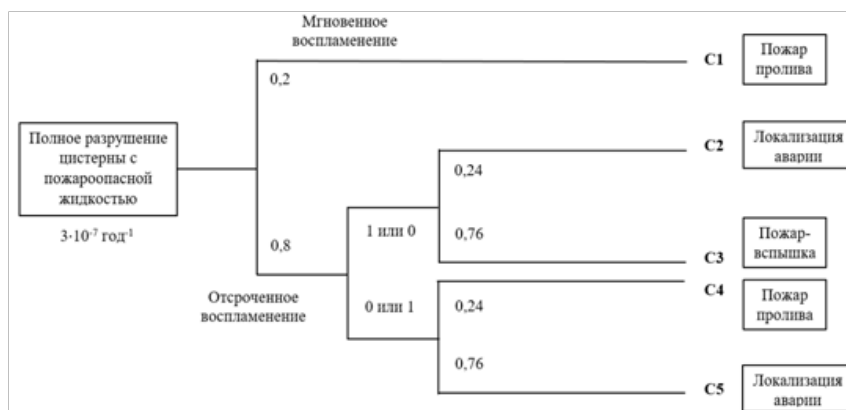


Рисунок 1 – «Дерево событий» при полном разрушении вагона-цистерны, содержащей нефтепродукт [8]

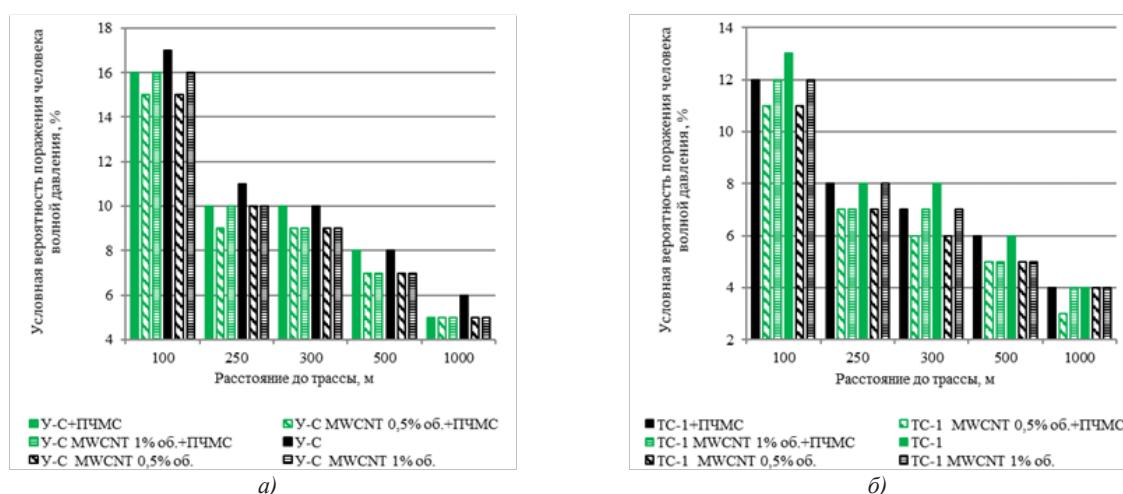


Рисунок 2 – Результаты расчета условной вероятности поражения человека волной давления вследствие полной разгерметизации вагона-цистерны с нефтепродуктом: а) уайт-спирит НЕФРАС-С4-155/200; б) керосин ТС-1

Таблица 1 – Размеры взрывоопасных зон при полной разгерметизации вагона-цистерны

Вещество	Взрывоопасная Зона, м	Концентрация МWCNT, об. %					
		-	0,5	1,0	-ПЧМС	0,5 ПЧМС	1,0 ПЧМС
Уайт-Спирит НЕФРАС-С4-155/200	R	31875,72	15937,86	21250,48	23906,79	18594,17	13281,55
	Z	1062,52	531,26	708,35	796,89	619,81	442,72
Керосин ТС-1	R	7379,55	3689,78	5165,69	5903,64	4427,73	2951,82
	Z	245,99	122,99	172,19	196,79	147,59	98,39

При расчете поражающих факторов учитываются параметры, характеризующие пожароопасные проявления обращающихся веществ, такие как интенсивность испарения и площадь пролива нефтепродуктов. Возможность образования газопаровоздушного облака вследствие выхода веществ из аппаратов и оборудования в окружающую среду предопределяет образование «огненного шара» (в случае если обращающиеся вещества имеют температуру начала кипения менее 60–65°C [16]) и пожара-вспышки. При реализации сценария пожар-вспышка (рис. 1) произведен расчет взрывоопасных зон [15] (R – радиус поражения, Z – высота поражения), результаты представлены в таблице 1.

Размер взрывоопасных зон снижается в два раза, что обусловлено снижением интенсивности испарения при введении и стабилизации углеродных наноструктур в среде нефтепродуктов.

Данные, полученные в ходе исследования влияния УНС на расчетные величины пожарного риска, также показывают снижение площади проливов наномодифицированных нефтепродуктов, следовательно, вероятность поражения человека тепловым излучением пожара также снижается (рис. 3).

Наибольшее снижение площади проливов наблюдается при концентрации наноструктур 0,5 об. % в совокупности с электрофизическим воздействием. Данный эффект обусловлен стабилизацией наночастиц в среде нефтепродуктов в условиях электрофизического воздействия.

Расчет потенциального (1) и индивидуального (2) пожарного риска согласно методики [14]. Значение потенциального риска определялось по формуле:

$$P(A) = \sum_{i=1}^j Q_{di}(a) \cdot Q(A_i) \quad (1)$$

где $Q_{di}(a)$ – максимальная условная вероятность

поражения человека; $Q(A)$ – вероятность реализации в течение года i -той ветви логической схемы аварии, год⁻¹.

Индивидуальный риск R , год⁻¹, определяем по формуле:

$$R = P(A) \cdot q \quad (2)$$

где $P(A)$ – значение потенциального риска для наиболее опасного события, год⁻¹; q – вероятность присутствия работников на объекте.

Результаты представлены в таблице 2.

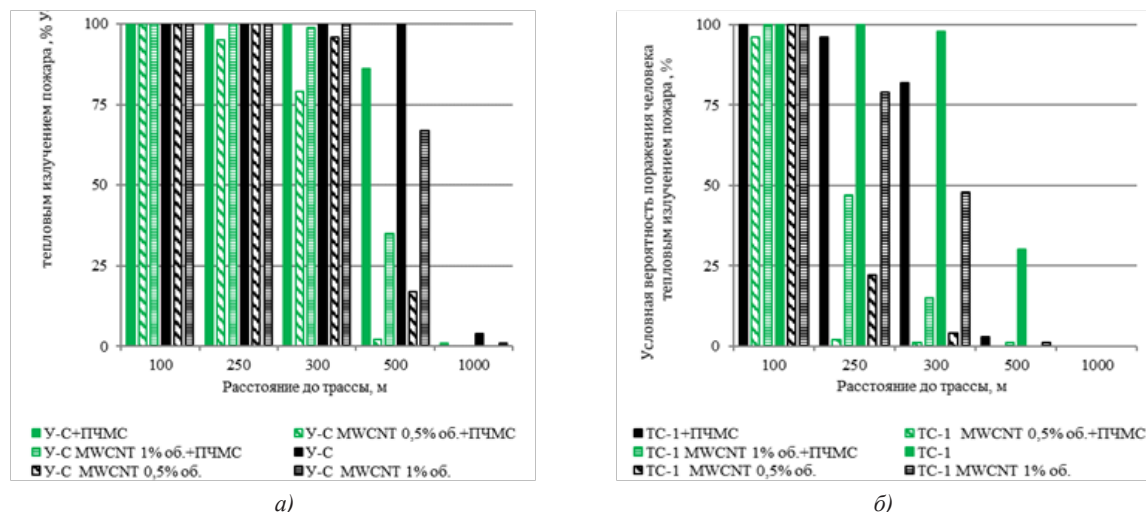


Рисунок 3 – Результаты расчета условной вероятности поражения человека тепловым излучением пожара вследствие полной разгерметизации вагона-цистерны с нефтепродуктом: а) «уайт-спирит» НЕФРАС-С4-155/200; б) керосин ТС-1

Таблица 2 – Значения потенциального (ППР) и индивидуального (ИПР) пожарного риска (год⁻¹·10⁻²) при реализации взрыва газопаровоздушной смеси при значениях расстояния до трассы r (м)

Растворитель «Уайт-спирит» НЕФРАС-С4-155/200												
r, м	У-С		MWCNT 0,5% об.		MWCNT 1,0% об.		ПЧМС		ПЧМС+MWCNT 0,5% об.		ПЧМС MWCNT 1,0% об.	
	ППР	ИПР ⁻²	ППР	ИПР ⁻²	ППР	ИПР ⁻²	ППР	ИПР ⁻²	ППР	ИПР ⁻²	ППР	ИПР ⁻²
100	17	5,78	15	5,10	16	5,44	16	5,44	15	5,10	16	5,44
250	11	3,74	10	3,40	10	3,40	10	3,40	9	3,06	10	3,40
300	10	3,40	9	3,06	9	3,06	10	3,40	9	3,06	9	3,06
500	8	2,72	7	2,38	7	2,38	8	2,72	7	2,38	7	2,38
1000	6	2,04	5	1,70	5	1,70	5	1,70	5	1,70	5	1,70
Керосин авиационный ТС-1												
r, м	ТС-1		MWCNT 0,5% об.		MWCNT 1,0% об.		ПЧМС		ПЧМС+MWCNT 0,5% об.		ПЧМС MWCNT 1,0% об.	
	ППР	ИПР ⁻²	ППР	ИПР ⁻²	ППР	ИПР ⁻²	ППР	ИПР ⁻²	ППР	ИПР ⁻²	ППР	ИПР ⁻²
100	13	4,42	11	3,74	12	4,08	12	4,08	11	3,74	12	4,08
250	8	2,72	7	2,38	8	2,72	8	2,72	7	2,38	7	2,38
300	8	2,72	6	2,04	7	2,38	7	2,38	6	2,04	7	2,38
500	6	2,04	5	1,70	5	1,70	6	2,04	5	1,70	5	1,70
1000	4	1,36	4	1,36	4	1,36	4	1,36	3	1,02	4	1,36

Заключение. Таким образом, использование «умных материалов» в качестве наноструктурных присадок позволяет повысить эффективность элементов системы противопожарной защиты на объектах транспортировки нефтепродуктов и может быть применено в качестве наноструктурных присадок для оперативного введения в среду нефтепродуктов вследствие реализации сценариев аварии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Nolan D.P. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical and related facilities. 2nd ed. Elsevier Inc. – 2011. – 340 p. DOI: 10.1016/B978-1-4377-7857-1.00039-2.
2. Солодова Н.Л., Терентьева Н.А. Наноматериалы и нанотехнологии в нефтепереработке // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. Т. 16, № 3. – С. 209-216.
3. Иванов А.В., Сорокин А.Ю., Ивахнюк Г.К., Демехин Ф.В. Управление электростатическими свойствами жидких углеводородов, модифицированных углеродными нанострук-

турами // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. Т. 26 № 7. – С. 16-27. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.16-27.
4. Wang J.-S., Wang J., Lü J.T. Quantum thermal transport in nanostructures // The European Physical Journal B. – 2008. – Vol. 62, Issue 4. – P. 381-404. DOI: 10.1140/epjb/e2008-00195-8.
5. Bhunia M.M., Panigrahi K., Das S., Chattopadhyay K.K., Chattopadhyay P. Amorphous graphene – Transformer oil nanofluids with superior thermal and insulating properties // Carbon. – 2018. — № Vol. 139. – С P. 1010-1019. DOI: 10.1016/j.carbon.2018.08.012.
6. Иванов А.В., Мифтахутдинова А.А., Ивахнюк Г.К., Башаричев А.В. Физико-технологические принципы и методика управления пожароопасными процессами при обращении с жидкими углеводородами в условиях стабилизации углеродных наноструктур // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2018. Т. 27 № 12. – С. 7-18. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.12.7-18.
7. Иванов А.В., Ивахнюк Г.К., Медведева Л.В. Методы управления свойствами углеводородных жидкостей в задачах обеспечения пожарной безопасности // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. Т. 26, № 9. — С. 30-37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.30-37.
8. Постановление Госгортехнадзора России от 26.04.2000 № 23 / РД 03-357-00 Методические рекомендации по состав-

лению декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта.

9. Иванов А. В., Мифтахутдинова А. А., Нефедьев С. А., Симонова М. А., Маслаков М. Д. Условия стабилизации наноструктур для безопасной транспортировки легковоспламеняющихся жидкостей // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 9. — С. 35–43. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.35-43.

10. Мифтахутдинова А.А., Иванов А.В., Скрипник И.Л., Шугайбов Р.А. Реализация технологии управления свойствами наноструктур в жидких углеводородах для снижения пожарного риска на объектах нефтегазового комплекса [Электронный ресурс] // Техносферная безопасность. — 2019. — Т. 23. — № 2. — С. 49-57.

11. Патент РФ № 2479005. Способ и устройство управления физико-химическими процессами в веществе и на границе раздела фаз. [авторы: Ивахнюк Г.К. (RU), Матюхин В.Н. (RU), Клачков В.А. (RU), Шевченко А.О. (RU), Князев А.С. (RU), Ивахнюк К.Г. (RU), Иванов А.В. (RU), Родионов В.А. (RU), Опубликовано: 10.04.2013. Бюл. № 10 Федеральной службы по интеллектуальной собственности] URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2479005> (дата обращения: 10.06.2021).

12. Патент РФ № 2709609. Способ снижения электризации жидких углеводородов при обращении с ними [Электронный ресурс]. [авторы: Иванов А.В. (RU), Мифтахутдинова А.А. (RU), Сорокин А.Ю. (RU), Симонова М.А. (RU), Ивахнюк Г.К. (RU), Медведева Л.В. (RU)]. Опубликовано: 19.12.2019. Бюл. № 35 Федеральной службы по интеллектуальной собственности URL: <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?facesredirect=true&id=c0f90a86941fc09a44fe4a48ad784ae8> (дата обращения: 16.01.2020).

13. Нормативно-правовое и научно-методическое обеспечение технического регулирования в области пожарной безопасности. Раздел 2. Том 1. Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов: отчет о НИР – М.: ВНИИПО, 2016 – 265 с.

14. Методические рекомендации по разработке декларации пожарной безопасности. утв. ФГБУ ВНИИПО МЧС России – М.: ВНИИПО, 2013 – 17 с..

15. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: приказ МЧС России от 10 июля 2009 № 404 (в ред. от 14.12.2010) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/> (дата обращения 08.09.17).

16. Об утверждении руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на технологических трубопроводах, связанных с перемещением взрывопожароопасных жидкостей»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 сентября 2015 г. № 366 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/420302829> (дата обращения 12.12.17).

17. Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности: Руководство по безопасности. Серия 09. Выпуск 45. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016 – 44 с.

18. Иванов А.В., Ивахнюк Г.К. Применение электрофизического метода управления процессами парообразования легковоспламеняющихся жидкостей в условиях модификации углеродными наноконструкциями [Текст] // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2015. – №3. – С.9-17.

19. Мифтахутдинова А.А., Таранцев А.А., Ивахнюк Г.К. Моделирование процессов парообразования модифицированных нефтепродуктов в условиях стабилизации углеродных наноструктур [Электронный ресурс] // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2019. – № 2. – С. 113-117.

20. Shah N., Panjala D., Huffman G.P. Hydrogen production by catalytic decomposition of methane // Energy & Fuels. – 2001. – Vol. 15, No. 6. –P. 1528-1534. DOI: 10.1021/ef0101964.

Статья поступила в редакцию 10.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 66.018.83

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0041

МЕТОДИКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

© 2021

Алексеев Дмитрий Владимирович, руководитель проекта

АО НДЦ НПФ «Русская лаборатория»

(197229, Россия, г. Санкт-Петербург, тер. Ольгино, ул. Вокзальная, д. 2, корп. 3, стр. 1,

e-mail: Dmitrij.Alekseev@ruslab.org)

Аннотация. Аварийные ситуации на предприятиях добычи и переработки нефти и газа наносят огромные финансовые и репутационные потери. Большинство аварий связано с разгерметизацией оборудования из-за высокого коррозионного износа его конструктивных материалов. Поэтому одной из главных задач в научном мире является улучшение механических и прочностных свойств сталей и других применяемых в промышленности материалов. В связи с этим особый интерес вызывает изучение влияния переменного частотно-модулированного потенциала на процесс кристаллизации, т.к. предварительные изучение влияния переменного частотно-модулированного потенциала на различные структуры, показывают положительные результаты. Впервые проведено экспериментальное сравнение методик обработки и способов влияния переменного частотно-модулированного потенциала на физико-механические свойства материалов. В лабораторных условиях выявлены явные конкурентные преимущества использования переменного частотно-модулированного потенциала в процессе кристаллизации относительно классических методов. Дальнейшее изучение процесса и внедрение процесса позволит значительно упростить и улучшить основные показатели данной методики.

Ключевые слова: авария, твердость, электрофизическая обработка, сплав, сталь, металлографическая структура, физико-механические свойства материалов, переменный частотно-модулированный потенциал, генератор, клетка Фарадея.

TECHNIQUE FOR ELECTROPHYSICAL CONTROL OF PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CONSTRUCTION MATERIALS TO REDUCE THE RISK OF EMERGENCY SITUATIONS

© 2021

Alekseev Dmitriy Vladimirovich, project manager

RUSSIAN LABORATORI Ltd.

(197229, Russia, St. Petersburg, ter. Olgino, st. Vokzalnaya, 2, bldg. 3, bldg. 1, e-mail: Dmitrij.Alekseev@ruslab.org)

Abstract. Emergency situations at oil and gas production and processing enterprises inflict huge financial and reputational losses. Most accidents are associated with equipment depressurization due to high corrosive wear of its structural materials. Therefore, one of the main tasks in the scientific world is to improve the mechanical and strength properties of steels and other materials used in industry. In this regard, of particular interest is the study of the influence of the variable frequency-modulated potential on the crystallization process, because preliminary studies of the influence of the variable frequency-modulated potential on various structures show positive results. For the first time, an experimental comparison of the processing methods and methods of the influence of the variable frequency-modulated potential on the physical and mechanical properties of materials is carried out. In laboratory conditions, clear competitive advantages of using a variable frequency-modulated potential in the crystallization process relative to classical methods have been revealed. Further study of the process and implementation of the process will significantly simplify and improve the main indicators of this technique.

Keywords: accident, hardness, electrophysical processing, alloy, steel, metallographic structure, physical and mechanical properties of materials, variable frequency modulated potential, generator, Faraday cage.

Введение. Значительно вырос процент техногенных аварий на различных предприятиях нашей страны. Чаще всего это связано с высокой скоростью износа конструктивных материалов, а возможность улучшения характеристик данных материалов на 10-15% без основательных изменений процесса производства выглядит очень перспективно.

Все имеющиеся на данный момент способы подразумевают значительное изменение производственных процессов, что ведёт за собой полный или частичный останов линии производства и значительные вложения в модернизацию процесса. Зачастую все эти

изменения ведут к улучшению качества выдаваемой продукции на те же 10-15%.

В этой связи изучение влияния переменного частотно-модулированного потенциала (далее – ПЧМЧ) на процесс кристаллизации представляется актуальным, т.к. предварительные изучение влияния ПЧМЧ на различные структуры, показывают положительные результаты [1-6].

Целью работы является экспериментальное исследование влияния ПЧМЧ на физико-механические свойства материалов, применяемых в нефтегазовой отрасли.

Материалы и результаты исследования. В качестве объекта исследования в данной работе использовали:

1) Сплав третник, который состоит из 37% свинца и 63% олова с температурой плавления 182°C (ГОСТ 21931-76);

2) Сталь марки У8 толщиной 5 мм;

3) Парафин очищенный (ГОСТ 16-960-71).

Для нагрева использовали муфельную печь МИМП-21УЭ. Расплавление производили в керамических тиглях с пределом нагревания 1200°C. Охлаждение проводили в воде с температурой 10-15°C. Кристаллизацию вели в керамической емкости цилиндрической.

Для электрофизической обработки применяли промышленный генератор, изготовленный согласно техническим условиям ТУ 4218-001-56316494-2004 [7-13]. Генератор ПЧМП представляет собой нелинейно-искаженный сигнал с двумя интервалами однородности. Схема установки приведена на рисунке 1.

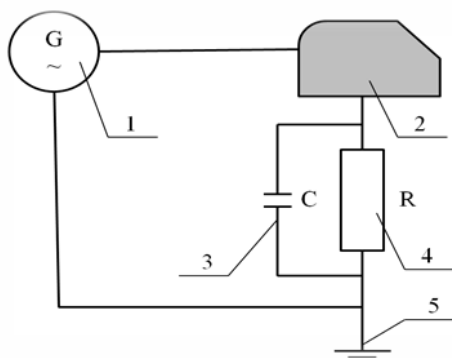


Рисунок 1 – Эквивалентная схема обработки свинца
1 – генератор ПЧМП; 2 – образец; 3 – емкостное сопротивление ДПС (диэлектрический пограничный слой); 4 – активное сопротивление ДПС; 5 – заземление

Для проведения опыта была взята навеска 350 г третника. Литейная форма использовалась из термостойкой керамики.

Перед началом эксперимента с поверхностей заготовок удалялась грязь и окислы, затем с помощью механической обработки достигалось мелкодисперсное состояние, для ускорения процесса плавления.

Образец материала в керамическом тигле помещали в муфельную печь, предварительно разогретую до температуры 500°C. После начала плавления образец выдерживали в печи в течение 10 мин до полного расплавления. Расплавленный образец вынимали из му-

фельной печи и разливали в заранее подготовленные формы, по дну которых были уложены контакты, подключенные к генератору переменного частотно-модулированного потенциала, тем самым воздействуя на расплав в течение времени, определяемого условиями эксперимента.

После полного остывания из формы вынимались готовые цилиндры 2x8 см. Форма, подключенная к генератору ПЧМП, как и сам генератор, были установлены в отдалении 1 м от остальных образцов, во избежание возможного ненаправленного воздействия ПЧМП на другие образцы.

Для сравнительных характеристик изготовленных цилиндров, из материала для плавки без воздействия на него ПЧМП, были отлиты типовые образцы. Третья серия расплавов образца была подключена к заземлению, для сравнения воздействия.

Воздействие ПЧМП проводили в «клетке Фарадея» для минимизации влияния внешних электрических полей.

Для проведения сравнения характеристик полученных образцов использовали снимки металлографической структуры твердого тела. Для изучения мест скопления структур, состоящих из множества микроскопических тел (кристаллов) применялся металлографический микроскоп [14-18]. Срезы цилиндрических форм представлены на рисунке 2.

Микроструктура среза стали марки У8 при различных воздействиях представлена на рисунке 3.

Микроструктура среза парафина при различных воздействиях представлена на рисунке 4.

Испытание на микротвердость вдавливанием по методу восстановленного отпечатка заключается в нанесении на испытуемую поверхность образца отпечатка под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику в течение определенного времени. После удаления нагрузки и измерения параметров полученного отпечатка, число микротвердости определяли по формуле (1), соответствующей форме наконечника – четырехгранной призмы с квадратным наконечником [19, 20].

$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

где F – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, кгс;

d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка, мм.

Полученные экспериментальные данные и определенная микротвердость приведены в таблице 1.

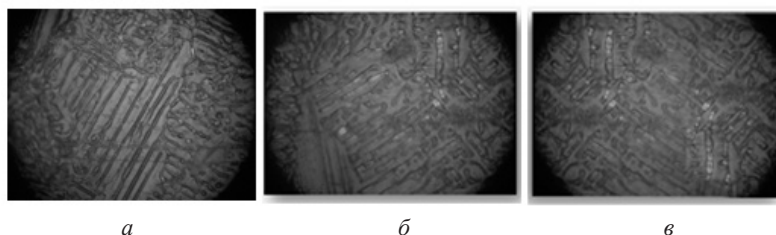


Рисунок 2 – Микроструктура образца третника после кристаллизации при различных воздействиях
а – срез обработанного образца путем воздействия на материал для плавки ПЧМП; б – срез необработанного образца; в – срез третник подключенного к заземлению

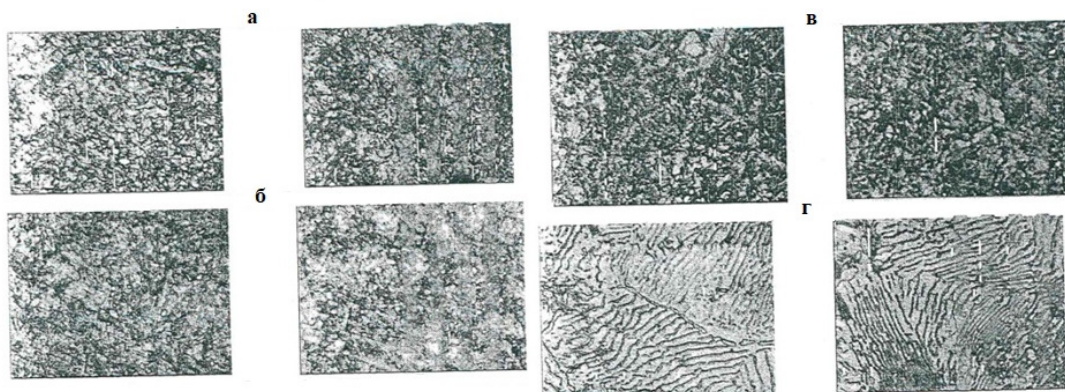


Рисунок 3 – Микроструктура среза стали марки У8 при различных воздействиях
а – обычная закалка; б – образцы, обработанные ПЧМП; в – образцы, охлаждаемые водой и обработанные ПЧМП; г – незакаленные образцы

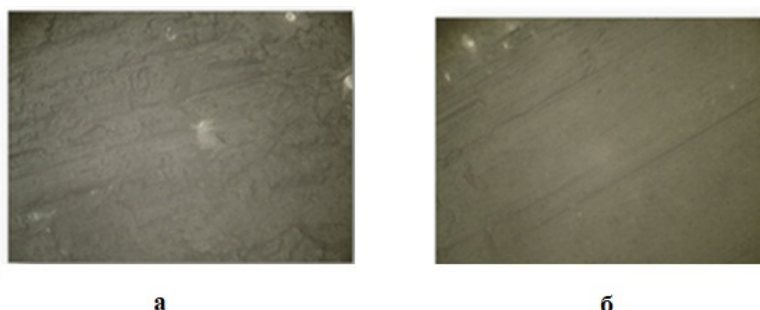


Рисунок 4 – Микроструктура среза парафина при различных воздействиях
а – образец, обработанный ПЧМП; б – необработанный образец

Таблица 1 – Экспериментальные результаты определения микротвердости путем вдавливания алмазного наконечника

Образец	Нормальная нагрузка, кгс	Среднее арифметическое длины обеих диагоналей, мм	Число микротвердости, МПа
Третник не обработанный	1	1,28	1139,8±0,5
Третник обработанный ЧМПЭП	1	1,12	1472,3±0,5
Третник заземлённый	1	1,20	1280,1±0,5
Сталь марки У8 не обработанная	1	0,86	2497,2±0,5
Сталь марки У8 обрабатывалась ЧМПЭП	1	0,83	2798,5±0,5
Сталь марки У8 заземлённые образцы	1	0,84	2599,1±0,05

Также исследовали скорость охлаждения парафина при различных условиях кристаллизации. Кривые охлаждения представлены на рисунке 5.

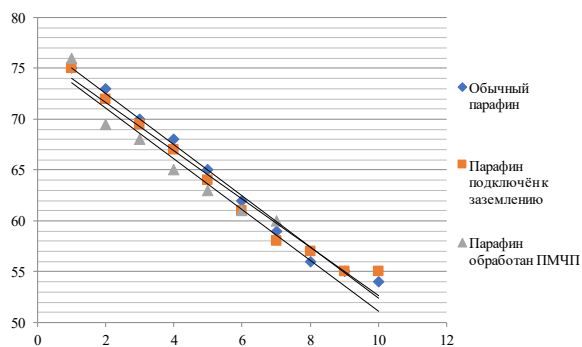


Рисунок 5 – Кривые охлаждения парафина

В ходе проведенного исследования установлено, что ПЧМП воздействует на структуру получаемых

при кристаллизации материалов и увеличивает физико-механические свойства, а именно твердость. Твердость сплава третника увеличилась 29% относительно контрольного образца, твердость стали марки У8 увеличилась на 12%.

Заключение. По результатам проведенных экспериментов предложено две гипотезы влияния ПЧМП:

- нейтрализация электростатических зарядов обеспечивает объемный характер образования твердой фазы, за счет чего структура металла становится мелкодисперсной, за счет чего увеличивается твердость. Это согласуется с данными по увеличению твердости сплава третника и стали марки У8, обработанных ПЧМП.

- увеличение жесткости связано со снятием электростатического электричества и образования, за счет этого, более плотной структуры, что доказано на примере парафина, скорость охлаждения которого выросла относительно контрольных образцов.

Таким образом, полученные результаты в ходе данного исследования могут быть использованы для достижения более высоких механических свойств сварных швов, в том числе при сварке трубопроводов нефти и газа, тем самым снижая риски возникновения аварийных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Карапетян И.Г. Основное оборудование электрических сетей. М.: ЭНАС, – 2014. – 109 с.
2. Думанский И.О. Измерение твердости металлов и сплавов. Тр. Института энергетики и транспорта. Архангельск, – 2013. – 10 с.
3. Глазов В.М. Микротвердость металлов. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962. – 35 с.
4. Новоселова Е.А., Ивахнюк Г.К. Выбор коррозионно-стойких сталей и сплавов на основе железа для предотвращения чрезвычайных ситуаций, вызванных коррозией нефтепроводов // Техносферная безопасность. 2021. – № (31). – С. 11-21.
5. Токунов В.И., Саумин А.З. Гидрофобные эмульсии для закачивания скважин в условиях трещиноватого коллектора и сероводородного воздействия // Нефтяное хозяйство. – 2000. – № 7. – С. 19-21.
6. Гумерский Х.Х., Мамедов Ю.Б. Российская нефтяная промышленность на пороге нового века: оценки прошлого, настоящего, будущего // Нефтяное хозяйство. – 2000. – № 7. – С. 22-26.
7. Давидзон М.И. О действии магнитного поля на слабопроводящие водные системы // Изв. вузов. Физика. 1985. – №4. – С. 89-94.
8. Соколовских Ю.М. Магнитная обработка веществ в химической промышленности // Химическая промышленность. – 2010. – №7. – С. 64-67.
9. Инструкция по применению и механизированной технологии нанесения силикагеполимеррастворных противокоррозионных покрытий. ВНИИК. Черкассы: НИИТЭХИМ. – 2003. – 44 с.
10. Головин В. А. Опыт эксплуатации и выбор полимерных покрытий для защиты от коррозии технологического оборудования в агрессивных средах // Сборник докладов Международной науч. - техн. конф 29-31 мая 2013 г: Новые материалы и технологии защиты от коррозии - 2013. СПб.: ЛенЭкспо. – 2013. – С. 24-27.
11. Шаталов А. А. Обеспечение требований промышленной безопасности при ремонтах и модернизации оборудования // Химическая техника. – 2015. – № 1. – С. 8-12.
12. Корольков А.П., Спиридонов Г.С., Анашечкин А.Д., Симонова М.А. Электрофизическое управление скоростью испарения жидких углеводородов. // Вестник Санкт-Петербургского института ГПС МЧС России. – 2005. – № 3(10).
13. Залетнев А.Ф., Комаров А.В., Ивахнюк Г.К., Симонова М.А. Снижение пожарной опасности при транспортировании углеводородных жидкостей. // Масложировая промышленность. – 2007. – №4.
14. Нагирняк А. Т. Коррозионная стойкость сталей и сплавов в среде синтеза N-нитрозодифениламина // Химическая промышленность. – 2005. – № 3. – С. 16-17.
15. Аверичева Г. А. Метод снижения коррозионной активности рассольных растворов для обеспечения эксплуатационной надежности охлаждающих систем // Вестник Кузбасского гос. техн. университета: научно-технич. журнал. Кемерово.: КузГТУ. – 2009. – № 6. – С. 68-73.
16. Баринов С. А. Некоторые экономические аспекты противокоррозионной защиты // Обз. инф. Сер.: общепромышленные вопросы. М.: НИИТЭХИМ. – 1999. – № 4(210). – 30 с.
17. Гумерский Х. Х. Российская нефтяная промышленность на пороге нового века: оценки прошлого, настоящего, будущего // Нефтяное хозяйство. – 2000. – № 7. – С. 22-26.
18. Тарасев Ю. И. Современный подход к оценке безопасности и надежности трубопроводной арматуры на всех стадиях ее жизненного цикла // Химическая техника. – 2002. – № 3. – С. 34-37.
19. Киченко А. Б. О некоторых особенностях контроля коррозии с помощью образцов – свидетелей и зондов электропротравления // Практика противокоррозионной защиты. – 2002. – № 2. – С. 22-30.
20. Киченко А. Б. Коррозионный мониторинг как важный фактор разработки и осуществления эффективной программы борьбы с коррозией на нефтегазовых промыслах // Практика противокоррозионной защиты. – 2014. – № 2. – С. 37-47.

Статья поступила в редакцию 25.10.2021
Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 656.3

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0042

ТЕХНОГЕННЫЙ ФАКТОР ПРИ ОЦЕНКЕ РИСКА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

© 2021

Сергеева Маргарита Дмитриевна, студент

Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого

(195251, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: antonova.md@edu.spbstu.ru)

Аннотация. Анализ риска чрезвычайных ситуаций техногенного характера при железнодорожных перевозках является неотъемлемой составляющей обеспечения безопасности на железной дороге. Как при перевозке пассажиров, так и при транспортировании грузов известны масштабные аварии, повлекшие за собой большое количество пострадавших и погибших, крупный материальный ущерб экономике и окружающей среде. При анализе статистики аварий на железной дороге выяснилось, что почти в половине всех случаев именно техногенный фактор (потенциальная опасность объектов техносферы) лежит в основе возникновения аварии на железнодорожном транспорте. К проявлениям техногенного фактора относятся неисправности железнодорожного состава и его частей, неисправности железнодорожных путей, автоматических устройств сигнализации, централизации и блокировки, а также конструктивные недостатки искусственных сооружений – железнодорожных мостов, тоннелей, эстакад для слива и налива нефти и нефтепродуктов. В данной статье для совершенствования оценки риска аварии на железнодорожном транспорте создано уникальное дерево отказов, которое составляют события, представляющие собой воздействия техногенного фактора. Дерево отказов, содержащее совокупность событий, происходящих непосредственно во время движения поезда, позволяет учесть динамику движущегося железнодорожного состава.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, оценка риска, техногенный фактор, дерево отказов, авария.

TECHNOGENIC FACTOR IN RISK ASSESSMENT IN RAILWAY TRANSPORT

© 2021

Sergeeva Margarita Dmitrievna, student

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(195251, Russia, Saint Petersburg, Politechnicheskaya Street, 29, e-mail: antonova.md@edu.spbstu.ru)

Abstract. Analysis of the risk of man-made emergencies in railway transportation is an integral component of ensuring safety on the railway. Both during the transportation of passengers and during the transportation of goods, large-scale accidents are known, resulting in a large number of injured and dead, major material damage to the economy and the environment. When analyzing the statistics of accidents on the railway, it turned out that in almost half of all cases, it is the technogenic factor (the potential danger of technosphere objects) that underlies the occurrence of an accident on railway transport. The manifestations of the technogenic factor include malfunctions of the railway composition and its parts, malfunctions of railway tracks, automatic signaling devices, centralization and blocking, as well as structural deficiencies of artificial structures - railway bridges, tunnels, overpasses for draining and filling oil and petroleum products. In this article, to improve the assessment of the risk of an accident in railway transport, a unique tree of failures has been created, which consists of events representing the effects of a technogenic factor. The failure tree, which contains a set of events that occur directly during the movement of the train, allows you to take into account the dynamics of a moving train.

Keywords: railway transport, risk assessment, technogenic factor, failure tree, accident.

Введение. Железнодорожный транспорт – один из основных способов перевозки пассажиров и грузов в России. Особенность российской системы железнодорожного транспорта во многом обусловлена особым географическим положением страны. Например, Транссибирская магистраль является самой длинной железной дорогой в мире: ее протяженность составляет около 9300 км [1]. Однако железнодорожная инфраструктура постоянно совершенствуется и развивается: провозная способность Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей уже к 2025 г. должна достигнуть 180 млн тонн угля в год [2]. Несомненными преимуществами железнодорожного транспорта являются: возможность перевозки больших партий грузов на большие расстояния, практически полная независимость от метеоусловий, высокая пропускная способность, а также регулярность перевозок [3-5].

Железнодорожный транспорт можно назвать одним из самых безопасных видов транспорта. Однако и в данном секторе существует вероятность возникновения аварийных ситуаций, как при пассажирских, так и при грузовых перевозках [6-7]. В соответствии с Правилами перевозок опасных грузов по железным дорогам существует тринадцать видов опасных грузов, среди которых взрывчатые, легковоспламеняющиеся, ядовитые вещества [8]. В связи с этим при железнодорожной перевозке опасных грузов малейший инцидент может повлечь за собой крупную аварию на всем грузовом составе. Усугубляющим обстоятельством такой чрезвычайной ситуации может стать наличие населенных пунктов в непосредственной близости к железнодорожным путям, проезд состава через мост или тоннель. Так, через г. Саратов проходит железная дорога, постоянно обслуживающая железнодорожные

станции, оперирующие опасными грузами – нефтепродуктами [9].

В 1988 г. 16 августа в Калининской области произошла крупная железнодорожная авария: пассажирский поезд «Аврора» сошел с рельсов в результате движения по путям с многочисленными неисправностями в виде перекосов, просядок. В результате аварии с рельсов сошли все вагоны состава, 31 человек погиб, более 100 человек пострадали. Анализ железнодорожной аварии в Калининской области, а также других аварий, повлекших за собой крупный материальный ущерб, большое количество погибших и пострадавших, показывает, что при наложении друг на друга различных обстоятельств и причин техногенный фактор (потенциальная опасность объекта техносферы) играет основополагающую роль.

При разборе крупных железнодорожных аварий за последние три десятилетия выяснилось, что почти в половине случаев их причиной являлось воздействие техногенного фактора, то есть движущей силы техносферы, определяющей возможность как повышения, так и понижения уровня безопасности; такое воздействие связано с техническими средствами или технологическими процессами. При этом в оставшейся половине случаев масштабные аварии на железной дороге возникали под непосредственным влиянием человеческого фактора, то есть решений, принятых человеком. К проявлениям человеческого фактора относятся ошибки персонала, обслуживающего состав, машиниста поезда, дежурного по железнодорожному переезду, умышленные действия третьих лиц. Например, ДТП на переезде зачастую происходят из-за недисциплинированности водителей автотранспорта, в частности, при попытках проезда через железнодорожные пути на запрещающий сигнал, нередко в нетрезвом состоянии. Террористические акты также относятся к проявлению человеческого фактора и могут быть выделены в отдельную группу.

В данной статье будут рассмотрены аварии, происходящие под воздействием техногенного фактора, то есть связанные с технологическими процессами и объектами техносферы.

Помимо железнодорожных путей общего пользования, предназначенных для обслуживания пассажиров, существуют также пути необщего пользования, обслуживающие организации, предприятия на основании заключенного договора.

При этом даже железнодорожные пути, являющиеся частью опасных производственных объектов (ОПО), с 2013 г. сами по себе не классифицируются как ОПО [10]. Однако задача анализа техногенного риска таких объектов остается актуальной, пока существует железнодорожный транспорт.

Целью данной статьи является совершенствование методики оценки риска с учетом влияния техногенного фактора на возникновение и развитие аварии на железнодорожном транспорте. Аварии, связанные с железнодорожным транспортом, в настоящий момент рассматриваются только по приказу Ростехнадзора от 11 апреля 2016 года № 144, где рассматривается случай, когда железнодорожная цистерна находится в статичном положении, например, при переливе ее содержимого [11]. Но, зачастую, аварии возникают именно при движении состава. Очевидно, существующие методики оценки риска не позволяют учесть фактор движущегося железнодорожного состава, а также причины, приводящие к аварии, в частности, техногенный фактор [12, 13].

Материалы и результаты исследования. На этапе сбора сведений и идентификации опасностей были рассмотрены крупные железнодорожные аварии за последние три десятка лет. Из тридцати пяти рассмотренных аварий восемнадцать произошли по причине действия человеческого фактора, четырнадцать аварий по причине действия техногенного фактора, три аварии – в результате террористических актов (рис. 1).

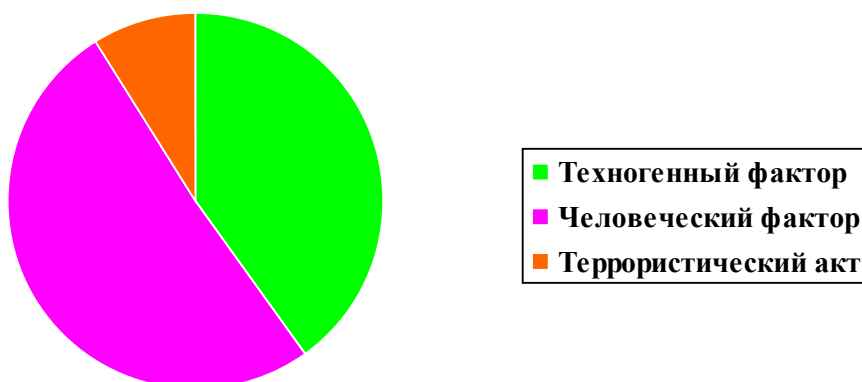


Рисунок 1 – Причины аварий на железнодорожном транспорте

Таким образом, в процентном соотношении аварии, возникшие в результате действия техногенного фактора, составляют 40% от общего числа аварий. Аварии, вызванные действием человеческого фактора, составляют 51% от общего числа аварий. Террористические акты являются причинами аварий на желез-

нодорожном транспорте в 9% всех случаев.

Основным этапом анализа риска аварии после идентификации опасностей является оценка риска аварии на ОПО [14-16]. Для оценки частоты иницирующих рекомендуется использовать логико-графические методы, например «Анализ деревьев отказов».

Указанный метод позволяет осуществить качественный и количественный анализ совокупности отказов технических устройств, инцидентов, ошибок персонала и внешних воздействий, приводящих к аварии [17-19].

В основе данного исследования лежит построение уникального дерева отказов для аварии на железнодорожном транспорте, совокупность отказов которой сводится к воздействию техногенного фактора. В рассматриваемом случае главным событием является авария на железнодорожном транспорте, возникающая под влиянием техногенного фактора.

Для построения дерева отказов при анализе открытой статистики были определены основные техноген-

ные воздействия, приводящие к авариям на железнодорожном транспорте (табл. 1).

Все техногенные воздействия были разделены на несколько основных групп: неисправности подвижного состава, путей, устройств СЦБ, а также аварии на искусственных сооружениях. Так, распространенной неисправностью подвижного состава является отказ тормозного оборудования, который возможен при износе или производственном браке тормозов. В 1987 г. 7 августа в г. Каменске-Шахтинском произошло столкновение грузового и пассажирского поездов из-за отказа тормозов у грузового поезда.

В результате аварии погибли 107 человек, 114 человек пострадали.

Таблица 1 – Техногенные воздействия, приводящие к аварии на железнодорожном транспорте

Техногенный фактор	
Неисправность подвижного состава	Отказ тормозного оборудования: в результате производственного брака тормозного оборудования или его износа при отсутствии контроля. Неисправности рам тележек вагонов: в результате производственного брака рамы тележки или повреждений вследствие коррозии при отсутствии необходимого обслуживания и контроля. Неисправности вагона: нарушение целостности вагона в процессе эксплуатации или производственный брак при отсутствии необходимого обслуживания и контроля.
Неисправность путей	Отказ стрелочного перевода: износ в процессе эксплуатации при отсутствии контроля, отказ автоматики. Размытие насыпи у железнодорожных путей (погодные условия). Выброс пути: воздействие сверхнормативных высоких температур, производственный брак при отсутствии контроля. Излом рельсов: износ при отсутствии контроля.
Неисправность устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ)	Отказов одного или нескольких устройств СЦБ.
Аварии на искусственных сооружениях	Авария на мостовом сооружении. Авария в тоннеле. Авария при погрузочно-разгрузочных мероприятиях: неправильное выполнение сливноналивных операций, разгерметизация вагонов с опасными веществами.

Металлические рамы тележек вагонов подвержены коррозии, в результате которой могут образоваться изломы и трещины; при отсутствии контроля могут возникнуть значительные повреждения.

Для исключения нарушения целостности вагона железнодорожного состава также необходим своевременный контроль: в процессе эксплуатации могут образоваться трещины в котле или шве, вмятины, обрыв хомута и другие неисправности.

При эксплуатации железнодорожных стрелочных переводов возможны отказы по причине износа, например, перегорание предохранителей или излом арматуры.

В случае, если стрелочный перевод автоматический, а не ручной, возможен отказ автоматики.

Насыпи у железнодорожных путей могут быть подвержены размытию при неблагоприятных погодных условиях (сильный дождь).

Выброс пути может возникнуть по причине воздействия сверхнормативных высоких температур, из-за которых в рельсах возникают температурные напряжения, способствующие расширению металла. Производственный брак рельсов при отсутствии контроля также может стать причиной выброса пути и последующей аварии. Излом рельсов возможен при их износе.

Неисправности устройств СЦБ составляют целый комплекс причин, подразумевающих рассмотрение одного или сразу нескольких отказов таких автоматических устройств как светофоры, релейные шкафы, трансформаторы, пульта, табло, аккумуляторы и т. д.

Состояние искусственных сооружений, например мостов и тоннелей, может стать причиной аварии на железнодорожном транспорте. Так, при проезде железнодорожного состава через мост может возникнуть перегрузка, приводящая к разрушению моста; способствовать разрушению мостовых конструкций могут ошибки при проектировании, дефекты строительства, а также природные условия – подтопления, размыты. Природные условия могут приводить также к размытию железнодорожных тоннелей.

При погрузочно-разгрузочных мероприятиях причинами аварии могут стать износ применяемого оборудования, например устройств налива.

На основе проведенного исследования было построено дерево отказов (рис. 2).

Вершина дерева отказов – главное событие, которое соединяется с совокупностью нижестоящих событий – отказами, образующими сценарии аварии. После построения дерева отказов следующим этапом является нахождение соответствующих вероятностей конечных событий [20].

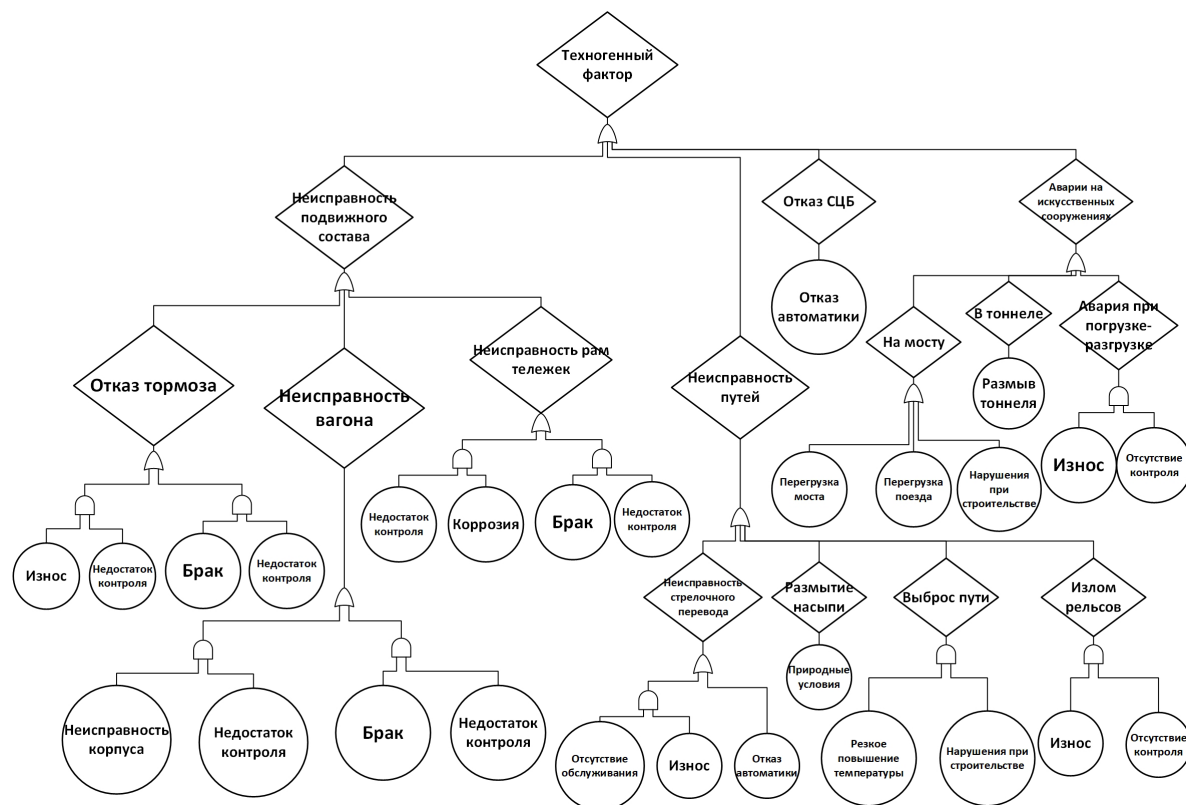


Рисунок 2 – Дерево отказов для иницилирующего события «крушение железнодорожного состава», в части техногенного фактора

Заключение. Таким образом, при проведении данного исследования была усовершенствована методика анализа риска аварии на железнодорожном транспорте путем создания дерева отказов, позволяющего оценить вероятность возникновения аварии главным образом из-за влияния техногенного фактора. При этом у данного способа оценки риска в перспективе имеется множество путей развития, в первую очередь, дерево отказов можно усложнить путём включения более конкретных технических причин аварии, установить дополнительные связи событий. Так, отказ СЦБ может состоять из возможности отказа любого автоматического элемента как самостоятельно, так и в совокупности с другими элементами. Создание дерева отказов, включающего техногенный и человеческий факторы, в том числе теракт, способствующие возникновению аварии на железнодорожном транспорте, является основой для магистерской диссертации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ханина А.В., Глинский В.А. Способы увеличения пропускной способности Транссибирской магистрали // Развитие теории и практики автомобильных перевозок, транспортной логистики: сборник научных трудов кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте». – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, 2017. – С. 231-238.
2. Пухова Е.В., Морозова Е.Н. Анализ реализации прогнозных рисков при осуществлении инфраструктурного проекта на железнодорожном транспорте // Транспортное дело России. – Москва: ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», 2019. – С. 228-230.
3. Брашко И.С., Самуйлов В.М. Преимущества и недостатки перевозки грузов железнодорожным транспортом // Проблемы организации и управления на транспорте: сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых и их научных руководителей. – Екатеринбург:

Уральский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 35-39.

4. Цыганов А.В., Кузьменко П.Ю. К вопросу о преимуществе железнодорожных перевозок автомобильного транспорта // Аллея науки. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2018. – С. 279-283.
5. Инкина С.А., Бадараева Р.В. Железнодорожные грузоперевозки: преимущества и недостатки // Вестник магистратуры. – Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2019. – С. 12-14.
6. Корниенко Д.В. Техногенные катастрофы периода перестройки и их влияние на СССР // АЛЛЕЯ НАУКИ. – Тула: Тульский государственный педагогический университет имени Л. Н. Толстого, 2017. – С. 738-740.
7. Наперов В.В. Вопросы организации перевозок грузов повышенной опасности железнодорожным транспортом // Приоритетные направления развития образования и науки: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Центр научного сотрудничества «Интеграция плюс», 2017. – С. 192-194.
8. Правила перевозок опасных грузов по железным дорогам, Протокол Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества от 05.04.1996 №15 [Электронный ресурс] – Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902165571>
9. Гарипов Р.Б., Грибанова Н.Ф., Снарский С.В., Баширзаде Р.Р. Анализ риска аварий при перевозке химически опасных веществ железнодорожным транспортом // Вестник Приволжского территориального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – С. 289-296.
10. Письмо Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 сентября 2013 года N 00-04-05/1541 «О Разъяснениях по вопросам идентификации в классификации участков транспортирования опасных веществ» [Электронный ресурс] – ГАРАНТ.РУ. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70372472/>
11. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 апреля 2016 года N 144 Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» [Элек-

тронный ресурс] – Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/420347908>

12. Антонова М.Д. Проблематика оценки риска аварий, связанных с разрушением железнодорожных составов на опасных производственных объектах // Неделя науки ИСИ. – СПб: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021. – С. 112-114.

13. Бызов А.П., Тихонкова Е.С. Оценка техногенного риска для опасных производственных объектов транспортирования опасных веществ // Неделя науки СПбПУ. – СПб: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2020. – С. 207-209.

14. Медведев В.И., Ощепков З.П., Рублев М.Г. Анализ защищенности критически важных объектов железнодорожного транспорта и обеспечение безопасности персонала // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018. – С. 33-39.

15. Спешилова С. А. Оценка устойчивости функционирования железнодорожной станции при возникновении чрезвычайной ситуации // Архивариус. – Иркутск: ФГБОУ ВО ИРГУПС Иркутского государственного университета путей сообщения, 2017. – С. 66-71.

16. Смолкин И.С., Руш Е.А. Сравнительный анализ методов оценки риска аварий и идентификации опасностей // Образование - Наука – Производство. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2018. С. – 154-160.

17. Федосов А.В., Ахметова Д.Д., Галеева А.Ф. Количественный анализ риска на опасном производственном объекте // Пожарная и аварийная безопасность. Сборник материалов XI Международной научно-практической конференции, посвященной Году пожарной охраны. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2016. – С. 184-187.

18. Зыков А.П., Квашин Д.Г., Борно О.И., Чуркин А.А. Проблемы идентификации опасных производственных объектов, связанных с транспортировкой опасных веществ железнодорожным транспортом // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2015. – С. 549-560.

19. Коробкова А.Г., Котов Д.Ю. Идентификация опасностей, оценка и управление рисками // Актуальные вопросы науки и техники. – Воронеж: Филиал РГУПС в г. Воронеж, 2018. – С. 55-61.

20. Раутлехт С.А., Фомин А.В. Обоснование применения вероятностных методов оценки показателей риска // Неделя науки СПбПУ. – СПб: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017. – С. 176.

Статья поступила в редакцию 10.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 620.197+621.794

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0043

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМ ЛЮДЕЙ С НАРУШЕНИЯМИ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

© 2021

Золкин Алексей Николаевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения»**Павлов Андрей Иванович**, студент факультета промышленных технологий**Чуфистов Олег Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»*Пензенский государственный технологический университет**(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, 1а/11,**e-mails: bornone@mail.ru, pavlovandrei2015@yandex.ru, kurator06m2@mail.ru)*

Аннотация. Изучена возможность применения методов традиционного анодирования и микродугового оксидирования для обработки некоторых изделий, изготовленных из алюминиевых сплавов и используемых в повседневной жизни людьми с нарушениями опорно-двигательного аппарата. Показано, что данные методы электролитического оксидирования позволяют получать на поверхностях алюминиевых сплавов оксидные покрытия, при этом покрытия, формируемые методом традиционного анодирования, преимущественно состоят из аморфного оксида алюминия, имеют низкую пористость и малую шероховатость наружных поверхностей, а покрытия, формируемые методом микродугового оксидирования, преимущественно состоят из кристаллического оксида алюминия, имеют малую пористость внутренних слоев, большую пористость внешних слоев и достаточно высокую шероховатость наружных поверхностей. Результатами натурных испытаний подтверждено, что обработка методами электролитического оксидирования позволяет комплексно улучшить эксплуатационные характеристики пандусов, кресел-колясок, ходунков, костылей и тростей. Установлено, что формируемые покрытия защищают подобные изделия от механических и коррозионных повреждений, улучшают внешний вид и повышают коэффициент трения при скольжении кожи, резины и полиуретана по их поверхностям. Выявлено, что у наружных поверхностей покрытий, формируемых микродуговым оксидированием, проявляется хорошая адгезия с лакокрасочными материалами, а внешние слои таких покрытий хорошо пропитываются жидким стеклом, которое при эксплуатации изделий в зимних условиях обеспечивает их защиту от обледенения.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, пандусы, кресла-коляски, ходунки, костыли, трости, традиционное анодирование, микродуговое оксидирование, покрытия, эксплуатационные свойства.

APPLICATION OF ELECTROLYTIC OXIDATION METHODS TO SOLVE SOME PROBLEMS OF PEOPLE WITH DISORDERS OF THE MUSCULOSKELETAL SYSTEM

© 2021

Zolkin Alexey Nikolaevich, postgraduate student of department «Engineering Technology»**Pavlov Andrey Ivanovich**, student of faculty of industrial technologies**Tchufistov Oleg Evgenevich**, candidate of technical sciences,
associate professor of department «Engineering technology»*Penza State Technological University**(440039, Russia, Penza, Baydukov bystreet /Gagarin street, 1a/11,**e-mails: bornone@mail.ru, pavlovandrei2015@yandex.ru, kurator06m2@mail.ru)*

Abstract. The possibility of using the methods of traditional anodizing and micro-arc oxidation for processing some products made of aluminum alloys and used in everyday life by people with disorders of the musculoskeletal system has been studied. It is shown that these methods of electrolytic oxidation make it possible to obtain oxide coatings on the surfaces of aluminum alloys, while coatings formed by traditional anodizing mainly consist of amorphous aluminum oxide, have low porosity and low roughness of the outer surfaces, and coatings formed by micro-arc oxidation mainly consist of crystalline aluminum oxide, have low porosity of the inner layers, large porosity of the outer layers and sufficiently high roughness of the outer surfaces. The results of field tests confirmed that the treatment by electrolytic oxidation methods allows to comprehensively improve the performance characteristics of ramps, wheelchairs, walkers, crutches and canes. It is established that the formed coatings protect such products from mechanical and corrosion damage, improve the appearance and increase the coefficient of friction when sliding leather, rubber and polyurethane on their surfaces. It was revealed that the outer surfaces of coatings formed by microarc oxidation exhibit good adhesion with paint and varnish materials, and the outer layers of such coatings are well impregnated with liquid glass, which, when operating products in winter conditions, provides them with protection from icing.

Keywords: aluminum alloys, ramps, wheelchairs, walkers, crutches, canes, traditional anodizing, micro-arc oxidation, coatings, performance properties.

Введение. В последние десятилетия методы электролитического оксидирования, включая традиционное анодирование (ТА) и микродуговое оксидирование (МДО), успешно используются в транспортном

и среднем машиностроении для повышения эксплуатационных свойств изготовленных из алюминиевых сплавов элементов сложных технических систем [1-5]. Гораздо меньше внимания уделяется применению этих методов для улучшения жизни людей с ограниченными возможностями здоровья.

В Российской Федерации на 1 января 2021 г. проживали 146,2 млн. человек [6]. Из них 11,6 млн. человек имели инвалидность [7]. Понятие «инвалидность» представляет собой часть другого, более широкого понятия – «ограниченные возможности здоровья». Люди с ограниченными возможностями здоровья имеют некоторые физические или психические особенности, вызывающие трудности в повседневной жизни. К числу людей с ограниченными возможностями здоровья относятся люди с нарушениями опорно-двигательного аппарата. Для преодоления выпадающих на их долю трудностей они вынуждены постоянно использовать пандусы, кресла-коляски, ходунки, костыли, трости, для изготовления которых все чаще используются алюминиевые сплавы [8, 9], характеризующиеся высокой удельной прочностью, хорошей технологичностью и относительно невысокой стоимостью [10, 11].

Однако, у перечисленных изделий, изготовленных из алюминиевых сплавов, даже при относительно непродолжительной эксплуатации проявляются отдельные недостатки. Пандусы быстро теряют первоначальный внешний вид и не всегда обеспечивают необходимое сцепление при контакте с колесами кресел-колясок, наконечниками костылей и обувными подошвами, особенно в условиях высокой влажности и обледенения. Стопорные кольца кресел-колясок, рукоятки и ножки ходунков, костылей, тростей также не безупречны – алюминиевые сплавы, используемые для их изготовления, легко царапаются, по ним скользят ладони, а в их кожу при этом вьедается алюминий. Попытки устранить перечисленные недостатки путем нанесения лакокрасочных покрытий позволяют получить положительный эффект только на краткосрочный период, поскольку лакокрасочные материалы со временем начинают отслаиваться от поверхностей изделий из алюминиевых сплавов вследствие слабой адгезии.

С целью проверки эффективности применения методов ТА и МДО для устранения перечисленных недостатков и улучшения эксплуатационных свойств изделий, предназначенных для людей с нарушениями опорно-двигательного аппарата, проведены комплексные исследования.

Материалы и результаты исследований. Фрагменты листов пандусов, стопорные кольца кресел-колясок, рукоятки и ножки ходунков, костылей и тростей из сплавов типа АМг3, АМг6 и Д16 подвергали обработке методами ТА и МДО. Обработку ТА проводили в течение 10...40 минут в анодном режиме в водном растворе щавелевой кислоты (30 г/л) при его средней температуре 20°C и плотности тока на поверхностях обрабатываемых изделий 2 А/дм². Обработку МДО проводили в течение 10...60 минут в анодно-катодном режиме в водном растворе едкого кали (5 г/л) и жидкого стекла (6 г/л) при его средней температуре 25°C и плотности тока на поверхностях обрабатываемых изделий в анодном полупериоде 15 А/дм². Толщину и микроструктуру покрытий, их фазовый состав и шероховатость их наружных поверхностей исследовали с помощью металлографического микроскопа МИМ-8, дифрактометра ДРОН-4 и профилометра Surtronic S-100 соответственно. Микротвердость покрытий измеряли в средней зоне по их поперечным микрошлифам с помощью микротвердомера ПМТ-3М. Коэффициенты трения резины, полиуретана и искусственной кожи по покрытиям изучали с помощью лабораторного трибометра. Эксплуатационные свойства обработанных методами ТА и МДО изделий определяли по результатам натурных испытаний в сравнении с эксплуатационными свойствами аналогичных изделий, которые не подвергались обработке методами ТА и МДО. Перед натурными испытаниями на покрытия некоторых изделий с помощью краскопульта дополнительно наносили акриловые краски и жидкое стекло до получения визуально сплошного равномерного слоя.

Установлено, что обработка ТА обеспечивает формирование плотных гляцевых покрытий (ТА-покрытий), преимущественно состоящих из аморфного оксида алюминия. В процессе роста ТА-покрытий на сплавах АМг3 и АМг6 их цвет меняется от золотистого до бронзового, а на сплаве Д16 – остается светло-серым. Обработка МДО обеспечивает формирование пористых матовых покрытий (МДО-покрытий), преимущественно состоящих из модификаций кристаллического оксида алюминия α -Al₂O₃ и γ -Al₂O₃. В процессе роста МДО-покрытий на сплавах АМг3, АМг6 и Д16 их цвет остается светло-серым, а на сплаве Д16 – светло-серым со слабым коричневым оттенком. Особенности строения ТА-покрытий и МДО-покрытий, отраженные в таблице 1, достаточно хорошо согласуются с данными, приведенными в других работах [12-15], хотя и имеют некоторые незначительные отличия по значениям толщины и пористости.

Таблица 1 – Особенности строения покрытий, формируемых на алюминиевых сплавах методами ТА и МДО

Сплав основы	Метод обработки	Основа покрытия	Цвет покрытия	Толщина покрытия, мкм	Пористость покрытия, %		Шероховатость покрытия, Ra
					внутренние слои	наружные слои	
АМг3	ТА	аморфный оксид алюминия	золотистый,	28...70	0,9	2,4	0,4...0,8
АМг6			бронзовый	26...65	0,9	2,4	0,4...0,8
Д16			серый	21...49	1,0	2,8	0,4...1,0
АМг3	МДО	-Al ₂ O ₃	серый	44...154	1,2	9,2	0,8...3,2
АМг6				43...149	1,2	9,4	0,8...3,2
Д16				40...142	1,2	9,8	0,8...3,4

Выявлено, что ТА-покрытия и МДО-покрытия отличаются не только по строению и составу, но и по свойствам. Твердость ТА-покрытий находится в интервале 350...550 HV (3,5...5,5 ГПа), т.е. сопоставима с твердостью закаленных среднеуглеродистых конструкционных сталей. Твердость МДО-покрытий значительно выше и находится в интервале 1150...1650 HV (11,5...16,5 ГПа), что также в значительной мере сочетается с данными в других работах [16-19].

Доказано, что значения коэффициентов трения резины, полиуретана и искусственной кожи по ТА-покрытиям и МДО-покрытиям значительно выше, чем по алюминиевым сплавам, не обработанным ТА и МДО. Причем, наиболее существенное увеличение коэффициента трения можно обеспечить путем нанесения на поверхности алюминиевых сплавов МДО-покрытий с более высокой шероховатостью наружных поверхностей.

Отмечено, что нанесенные на поверхности изделий акриловые краски и жидкое стекло после полного высыхания сложнее удаляются с поверхностями с ТА-покрытиями, чем с поверхностями не обработанных ТА и МДО. А с поверхностями с МДО-покрытиями, особенно с высокой шероховатостью, полностью удалить следы акриловых красок и жидкого стекла, как правило, не представляется возможным, поскольку они остаются в порах и впадинах поверхностного микрорельефа.

Натурными испытаниями продолжительностью не менее 12 месяцев подтверждено, что фрагменты листов пандусов с ТА-покрытиями и МДО-покрытиями меньше изнашиваются и более устойчивы к механическим и коррозионным повреждениям. При этом фрагменты листов пандусов с ТА-покрытиями дольше сохраняют первоначальный внешний вид, чем фрагменты листов пандусов с МДО-покрытиями, во внешние пористые слои которых проникают разные вещества из внешней среды. Однако МДО-покрытия обеспечивают лучшее сцепление с материалами колес кресел-колясок, обувных подошв и наконечников ходунков, тростей и костылей. Особенно хорошо это заметно, когда колеса одной стороны кресла-коляски движутся по полосе с МДО-покрытием, а колеса другой стороны – по поверхности пандуса с тонкой естественной оксидной пленкой. Кроме того, внешние пористые слои МДО-покрытий хорошо пропитываются жидким стеклом, которое препятствует не только потере первоначального внешнего вида пандусов, но и их обледенению, а, следовательно, и неконтролируемому скольжению по пандусам.

Показано, что стопорные колеса кресел-колясок, рукоятки и ножки ходунков, костылей с ТА-покрытиями и МДО-покрытиями меньше подвержены механическим и коррозионным повреждениям, лучше сцепляются с кожей ладоней и не оставляют на ней следов алюминия даже при длительном интенсивном использовании. При этом ТА-покрытия позволяют дольше сохранить первоначальный внешний вид данных элементов изделий, поскольку во внешние пори-

стые слои МДО-покрытий проникают потожировые выделения и разные вещества из внешней среды. Также следует отметить, что лакокрасочные материалы практически вообще не отслаиваются от элементов с МДО-покрытиями, а небольшие отслаивания лакокрасочных материалов от ТА-покрытий в редких случаях все же имеют место.

Заключение. Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что с помощью ТА и МДО на поверхностях изделий из алюминиевых сплавов, предназначенных для людей с нарушениями опорно-двигательного аппарата, можно получать качественные ТА-покрытия и МДО-покрытия. При этом ТА-покрытия преимущественно состоят из аморфного оксида алюминия, характеризуются малой пористостью внутренних и внешних слоев и невысокой шероховатостью наружных поверхностей. МДО-покрытия преимущественно состоят из кристаллического оксида алюминия, характеризуются малой пористостью внутренних слоев, большой пористостью внешних слоев и достаточно высокой шероховатостью наружных поверхностей. Значительная твердость аморфного и кристаллического оксида алюминия обеспечивает повышенную устойчивость ТА-покрытий и МДО-покрытий к истиранию и механическим повреждениям, а хорошая химическая стойкость оксида алюминия [20] в сочетании с малой пористостью внутренних слоев ТА-покрытий и МДО-покрытий обуславливают их высокую устойчивость к коррозии. Малая пористость наружных слоев и невысокая шероховатость поверхностей ТА-покрытий препятствуют налипанию и проникновению в них различных веществ из внешней среды, вследствие чего такие покрытия долго способны сохранять свой внешний вид, но, несмотря на это, их сцепление с резиной, полиуретаном и кожей немного лучше, чем у поверхностей изделий, покрытых тонкими естественными пленками. Большая пористость внешних слоев и достаточно высокая шероховатость поверхностей МДО-покрытий обеспечивают их хорошие фрикционные свойства, наилучшее сцепление с резиной, полиуретаном и кожей, повышенную адгезию лакокрасочных материалов и жидкого стекла, способного уменьшить обледенение. Потому формирование ТА-покрытий и МДО-покрытий позволяет улучшить эксплуатационные свойства изделий, изготовленных из алюминиевых сплавов и предназначенных для людей с нарушениями опорно-двигательного аппарата. Это улучшение эксплуатационных свойств создает условия не только для экономии сил и получения положительных эмоций потребителями этих изделий при решении своих повседневных бытовых задач, но и для повышения уровня их безопасности, ведь проскальзывание ладоней по поверхностям тростей или костылей, неконтролируемое скольжение колес кресел-колясок по пандусам может привести к получению тяжелых травм и другим крайне нежелательным последствиям. В связи с этим, представляется крайне необходимым обеспечить внедрение представленной

разработки в серийное производство, а также изучить возможности использования других сложных производственных технологий для решения повседневных проблем людей с ограниченными возможностями здоровья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Парфенов Е.В., Фаткулин А.Р., Лазарев Д.М., Шевчук И.Ю., Даутов А.И. Автоматизированная технологическая установка твердого анодирования деталей вертолетов с диагностикой толщины покрытия // Вестник УГАТУ. – 2014. – Т.18. – С. 73-79.
2. Ившин Я.В., Бурмистров А.В., Саликеев С.И., Капустин Е.Н. Анодирование спиральных элементов вакуумных насосов // Вестник КТУ. – 2011. – Т.18. – №3. – С. 116-119.
3. Злотников И.И., Проневич И.О., Сологубов А.П. Исследование свойств модифицированных керамических покрытий, получаемых методом микроплазменного анодирования на поверхности алюминия // Вестник КГТУ. – 2019. – №1. – С. 35-40.
4. Гирн А.В., Хартов В.В., Вахтеев Е.В., Евкин И.В. Совершенствование технологии нанесения защитных покрытий на конструкции космических аппаратов микродуговым оксидированием // Вестник СибГАУ. – 2011. – №5(38). – С. 134-137.
5. Степанова С.В., Замятин Д.А., Трушкина Т.В., Михеев А.Е. Актуальность микродугового оксидирования в задачах упрочнения изделий ракетно-космической техники // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2018. – Т.1. – С. 141-142.
6. Сайт Федеральной службы государственной статистики РФ [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781> (дата обращения 11.11.2021).
7. Сайт Федеральной службы государственной статистики РФ [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/13964> (дата обращения 11.11.2021).
8. Zackowitz I.B., Vredenburg A.G., Hedge A. A critical analysis of the usability and design of aluminum wheelchair ramps // Proceedings of Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. – 2005. – 49(8). – P. 803-807
9. Liu H.-Y., Pearlman J., Cooper R., Hong E.-K., Wang H., Salatin B. Evaluation of aluminum ultralight rigid wheelchairs versus other ultralight wheelchairs using ANSI/RESNA standards // Journal of Rehabilitation Research and Development. – 2010. – 47(5). – P. 441-455.
10. Митяев А.А., Беликов С.Б., Волчок И.П. Производство и применение алюминиевых сплавов в транспортном машиностроении // Вестник двигателестроения. – 2006. – №1. – С. 155-158.
11. Васина М.А. История получение и применения алюминия и его сплавов // Вопросы истории естествознания и техники. – Т. 41. – №3. – С. 560-575.
12. Chufistov O.E., Chufistov E.A., Artemiev V.P. Technology, structure and properties of coatings, formed by anodic oxidation methods on aluminum and its alloys // Non-ferrous Metals. – 2010. – №2. – С. 37-40.
13. Аль-Бдейри М.Ш.Х. Обзор методов гальвано-плазменной модификации для производства анодированных покрытий на сплавах алюминия: микроструктура, свойства и применение // Вестник ПНИПУ. – 2020. – Т.23. – №3. – С. 51.-59.
14. Tchufistov O.E., Tchufistov E.A., Zolkin A.N. Breakdown voltage and electrical strength of oxide coatings formed on aluminum alloys by electrolytic oxidation methods // Materials Today: Proceeding. – 2021. – V.38. – №5. – P. 1728-1731.
15. Малышев В.Н. Оптимизация процесса формирования износостойких керамических покрытий методом микродугового оксидирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. №9. С. 32-38.
16. Горчаков А.И., Бородин Н.М., Кривоносова Е.А. Кинетические закономерности формирования покрытий на сплавах алюминия при микродуговом оксидировании // Вестник ПНИПУ. – 2011. – Т.13. – №4. – С. 78.-85.
17. Атрощенко Э.С., Чуфистов О.Е., Казанцев И.А., Симцов В.В. Структура и микротвердость покрытий, формируемых методами анодного оксидирования, на изделиях из алюминиевых сплавов // Материаловедение. – 2001. – №9. – С. 43-46.
18. Коломейченко А.В., Шарифуллин С.Н., Логачев В.Н., Кузнецов Ю.А., Кравченко И.Н., Баранов Ю.Н. Свойства покрытий, сформированных плазменным электролитическим оксидированием, на пластически деформированном алюминиевом сплаве АО3-7 // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. – 2019. – Т.1. – №10. – С. 428-432.

19. Марков М.А., Быкова А.Д., Красиков А.В., Фармаковский Б.В., Герашенков Д.А. Формирование износостойких покрытий микродуговым оксидированием алюминия // Новые огнеупоры. – 2018. – №4. – С. – 124-131.
20. Абызов А.М. Оксид алюминия и алюмооксидная керамика. Свойства Al₂O₃ и промышленное производство дисперсного Al₂O₃ // Новые огнеупоры. – 2019. – №1. – С. 16-23.

Статья публикуется при поддержке гранта Фонда содействия инновациям, выделенного по договору 15279ГУ от 14.06.2020 г. в рамках программы «УМНИК»

Статья поступила в редакцию 22.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК: 614.88

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0044

**НОРМАТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОНЯТИЯ ПЕРВОЙ ПОМОЩИ
НА ТЕХНОСФЕРНЫХ ПРОИСШЕСТВИЯХ**

© 2021

Рева Юрий Викторович, кандидат военных наук, доцент кафедры сервис безопасности
Трегубов Павел Олегович, студент магистратуры по специальности «Техносферная безопасность»
*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России
(196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149)*

Аннотация. В статье рассмотрено закрепление понятия первой помощи в законодательстве Российской Федерации, отличия первой помощи от первой медицинской помощи. Проанализированы нормативно-правовые акты, которые регламентируют первую помощь, права и обязанности граждан по отношению к данному понятию. Рассмотрена ответственность различных категорий субъектов за неоказание первой помощи, состояния потерпевшего, при которых оказывается первая помощь, мероприятия по оказанию первой помощи. Авторами предложен универсальный алгоритм оказания первой помощи на месте техносферного происшествия. Изучен вопрос перечня состояний, при которых оказывается первая помощь, и перечня мероприятий по оказанию первой помощи. Даны рекомендации очевидцам техносферного происшествия по сообщению в специализированные службы о человеке, которому требуется медицинская помощь. Рассмотрен вопрос необходимости разработки и принятия алгоритма и рекомендаций оказания первой помощи сотрудниками аварийно-спасательных формирований МЧС России, а также рекомендаций по оснащению имуществом для оказания первой помощи. Даны рекомендации по формированию медицинской аптечки.

Ключевые слова: Нормативно-правовой акт, законодательство, первая помощь, первая медицинская помощь, потерпевший.

LEGISLATIVE REGULATION OF THE CONCEPT OF FIRST AID AT TECHNOSPHERE ACCIDENTS

© 2021

Reva Yuri Viktorovich, candidate of military sciences,
associate professor of the department of security service saint
Tregubov Pavel Olegovich, master's student
*Petersburg State University of the Ministry of Emergency Situations of Russia
(196105, St. Petersburg, Moskovsky Prospekt, 149)*

Abstract. The article considers the consolidation of the concept of first aid in the legislation of the Russian Federation, the difference between first aid and the first medical aid. The authors analyse the normative and legal acts that regulate first aid and the rights and duties of citizens in relation to this concept. The responsibility of different categories of subjects for failure to provide first aid, the condition of the victim, in which first aid is provided, first aid measures are considered. The authors propose a universal algorithm for first of conditions in which first aid is provided and the list aid first aid activities is studied. The recommendations for witnesses of technosphere accidents to inform the specialized services about a person in need of medical aid have been given. The need to develop and adopt an algorithm and recommendations for the provision of first aid by employees of emergency rescue teams of the Ministry of Emergency Situations of Russia, as well as recommendations for provision of equipment for the first aid is considered. Recommendations on the formation of a first-aid kit are given.

Keywords: regulatory and legal act, legislation, first aid, first medical aid, victim.

Введение. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения до трети пострадавших в техносферных происшествиях по жизненным показаниям нуждаются в оказании медицинской помощи, а жизнь каждого пятого могла быть спасена при своевременно и правильно оказанных мероприятиях первой помощи. В связи с большим количеством пострадавших на техносферных происшествиях в современном мире актуальной представляется проблема обучения оказанию мероприятий первой помощи не только спецконтингента, но всего гражданского населения [1]. Таким образом, представляется огромная важность оказания первой помощи и ответственности, которая ложится на сотрудников службы спасения и МЧС, а также гражданских лиц, находящихся на месте техносферного происшествия.

Единой государственной системой предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) в Российской Федерации предусматривается оказание пострадавшему в техносферном происшествии первой помощи до предоставления квалифицированной врачебной помощи. Однако до настоящего времени в системе МЧС России отсутствует единый, утвержденный ведомственным приказом, алгоритм оказания первой помощи [2].

В связи с вышеизложенным, **цель** работы – анализ понятия первой помощи, закрепленного в законодательстве Российской Федерации и подзаконных нормативно-правовых актах, отличия данного понятия от первой медицинской помощи.

Предлагается рассмотреть ответственность различных категорий субъектов за неоказание первой

помощи, медицинские состояния потерпевшего лица, при которых оказывается первая помощь, мероприятия по оказанию первой помощи.

Материалы и результаты исследования. Положениями статьи 31 Федерального закона «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» установлено, что первая помощь до оказания медицинской помощи оказывается гражданам при несчастных случаях, травмах, отравлениях и других состояниях и заболеваниях, угрожающих их жизни и здоровью, лицами, обязанными оказывать первую помощь в соответствии с федеральным законом или со специальным правилом и имеющими соответствующую подготовку, в том числе сотрудниками органов внутренних дел Российской Федерации, сотрудниками, военнослужащими и работниками Государственной противопожарной службы, спасателями аварийно-спасательных формирований и аварийно-спасательных служб. Водители транспортных средств и другие лица вправе оказывать первую помощь при наличии соответствующей подготовки и (или) навыков [3].

Пострадавшему лицу мероприятия первой помощи проводятся до прибытия на место происшествия представителей медицинских служб и в первую очередь призваны не допустить ухудшения состояния и сохранить человеку жизнь. Пострадавшему первая помощь оказывается немедленно и качественно, при создании условий для его дальнейшего лечения и выздоровления.

Первая помощь не заменяет собой медицинскую помощь со стороны медицинского персонала системы лечебных учреждений, обладающих соответствующей квалификацией, и оказывается лишь до прибытия медицинского работника при определенных, установленных законодательством, состояниях пострадавшего лица.

Нормами права определена обязанность оказывать первую помощь на месте происшествия работниками, сотрудниками и военнослужащими органов внутренних дел, Государственной противопожарной службы, в том числе и добровольными пожарными, спасателями, а также представителями охранных организаций. Для данной категории лиц установлена ответственность за неказание мероприятий первой помощи, от дисциплинарной до уголовной (составы уголовных преступлений, предусмотренных ст. 124, 125 Уголовного кодекса Российской Федерации [4]).

В условиях необходимости оказания первой помощи безотлагательно, в возможно кратчайшие сроки, право на ее оказание предоставлено очевидцам, которые находятся непосредственно рядом с пострадавшим лицом, при наличии у них соответствующих знаний, навыков и подготовки. В большинстве случаев это водители автотранспортных средств, охранники или работники предприятий и организаций, которым известны приемы оказания первой помощи, полученные на занятиях по профессиональной подготовке. У них чаще всего имеется аптечка, которую можно использовать для более эффективных действий по ока-

занию мероприятий первой помощи пострадавшему лицу[5].

Умение оказывать мероприятия первой помощи – это гражданский долг каждого человека. Федеральным законом "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера" регламентирована обязанность граждан РФ, среди прочего, изучать приемы оказания первой помощи пострадавшим, постоянно совершенствовать свои знания и практические навыки в указанной области [6]. От качества оказания и своевременности мероприятий первой помощи в значительной степени зависит дальнейшее состояние здоровья потерпевшего и его жизнь.

Для граждан, добровольно оказывающих первую помощь, ответственность за ее неказание законодательством не установлена, за исключением случаев умышленного оставления лица, нуждающегося в первой помощи, в беспомощном состоянии.

В данном случае, как справедливо отмечает Владимирова О.В. [7], юридической ответственности за неправильное оказание помощи человек без медицинского образования не несет, так как жизнь человека провозглашена высшей ценностью, и сама попытка защитить эту ценность, ставится выше возможной ошибки в ходе оказания первой помощи, так как дает человеку шанс выжить.

Без оказания первой помощи в промежуток между происшествием и прибытием на место бригады скорой медицинской помощи, который чаще всего занимает несколько минут, у пострадавшего могут развиться тяжелые нарушения жизнедеятельности организма, либо может быть констатирована его смерть[8].

Таким образом, первую помощь определяют, как комплекс мероприятий, направленных на поддержание жизни и здоровья, оказываемых до оказания медицинской помощи пострадавшим при несчастных случаях, травмах, отравлениях и других состояниях, и заболеваниях, угрожающих их жизни и здоровью, участниками оказания первой помощи [9]. Цель ее состоит в устранении явлений, которые угрожают жизни, человека и предупреждении дальнейших повреждений и возможных осложнений здоровья пострадавшего лица.

Приказом Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации "Об утверждении перечня состояний, при которых оказывается первая помощь, и перечня мероприятий по оказанию первой помощи" установлен следующий перечень состояний пострадавшего лица, при которых оказывается первая помощь (приложение №1) [10]:

1. Отсутствие сознания.
2. Остановка дыхания и кровообращения.
3. Наружные кровотечения.
4. Инородные тела верхних дыхательных путей.
5. Травмы различных областей тела.
6. Ожоги, эффекты воздействия высоких температур, теплового излучения.
7. Отморожение и другие эффекты воздействия

низких температур.

8. Отравления.

При указанных состояниях выполняются следующие мероприятия:

1. Мероприятия по оценке обстановки и обеспечению безопасных условий для оказания первой помощи:

- 1) определение угрожающих факторов для собственной жизни и здоровья;
- 2) определение угрожающих факторов для жизни и здоровья пострадавшего;
- 3) устранение угрожающих факторов для жизни и здоровья;
- 4) прекращение действия повреждающих факторов на пострадавшего;
- 5) оценка количества пострадавших;
- 6) извлечение пострадавшего из транспортного средства или других труднодоступных мест;
- 7) перемещение пострадавшего.

2. Вызов скорой медицинской помощи, других специальных служб, сотрудники которых обязаны оказывать первую помощь в соответствии с федеральным законом или со специальным правилом.

3. Определение наличия сознания у пострадавшего.

4. Мероприятия по восстановлению проходимости дыхательных путей и определению признаков жизни у пострадавшего:

- 1) запрокидывание головы с подъемом подбородка;
- 2) выдвижение нижней челюсти;
- 3) определение наличия дыхания с помощью слуха, зрения и осязания;
- 4) определение наличия кровообращения, проверка пульса на магистральных артериях.

5. Мероприятия по проведению сердечно-легочной реанимации до появления признаков жизни:

- 1) давление руками на грудину пострадавшего;
- 2) искусственное дыхание «Рот ко рту»;
- 3) искусственное дыхание «Рот к носу»;
- 4) искусственное дыхание с использованием устройства для искусственного дыхания (в соответствии с утвержденными требованиями к комплектации медицинскими изделиями аптечек (укладок, наборов, комплектов) для оказания первой помощи).

6. Мероприятия по поддержанию проходимости дыхательных путей:

- 1) придание устойчивого бокового положения;
- 2) запрокидывание головы с подъемом подбородка;
- 3) выдвижение нижней челюсти.

7. Мероприятия по обзорному осмотру пострадавшего и временной остановке наружного кровотечения:

- 1) обзорный осмотр пострадавшего на наличие кровотечений;
- 2) пальцевое прижатие артерии;
- 3) наложение жгута;
- 4) максимальное сгибание конечности в суставе;
- 5) прямое давление на рану;

6) наложение давящей повязки.

8. Мероприятия по подробному осмотру пострадавшего в целях выявления признаков травм, отравлений и других состояний, угрожающих его жизни и здоровью, и по оказанию первой помощи в случае выявления указанных состояний:

- 1) проведение осмотра головы;
- 2) проведение осмотра шеи;
- 3) проведение осмотра груди;
- 4) проведение осмотра спины;
- 5) проведение осмотра живота и таза;
- 6) проведение осмотра конечностей;
- 7) наложение повязок при травмах различных областей тела, в том числе окклюзионной (герметизирующей) при ранении грудной клетки;
- 8) проведение иммобилизации (с помощью подручных средств, автомобилизация, с использованием медицинских изделий (в соответствии с утвержденными требованиями к комплектации медицинскими изделиями аптечек (укладок, наборов, комплектов) для оказания первой помощи);

9) фиксация шейного отдела позвоночника (вручную, подручными средствами, с использованием медицинских изделий (в соответствии с утвержденными требованиями к комплектации медицинскими изделиями аптечек (укладок, наборов, комплектов) для оказания первой помощи);

10) прекращение воздействия опасных химических веществ на пострадавшего (промывание желудка путем приема воды и вызывания рвоты, удаление с поврежденной поверхности и промывание поврежденной поверхности проточной водой);

11) местное охлаждение при травмах, термических ожогах и иных воздействиях высоких температур или теплового излучения;

12) термоизоляция при отморожениях и других эффектах воздействия низких температур.

9. Придание пострадавшему оптимального положения тела.

10. Контроль состояния пострадавшего (сознание, дыхание, кровообращение) и оказание психологической поддержки.

11. Передача пострадавшего бригаде скорой медицинской помощи, другим специальным службам, сотрудники которых обязаны оказывать первую помощь в соответствии с федеральным законом или со специальным правилом.

Данный перечень мероприятий оказания первой помощи получил законодательное закрепление в приложении №2 к Приказу Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации "Об утверждении перечня состояний, при которых оказывается первая помощь, и перечня мероприятий по оказанию первой помощи".

Как отмечает Шарabanова И.Ю. [11], оказанием мероприятий первой помощи должен руководить один человек. Оказывать помощь следует уверенно, спокойно, не проявляя суетливости, и руководствуясь основным правилом: не причинить большего вреда

пострадавшему лицу своими неумелыми действиями.

Если у пострадавшего имеются множественные повреждения, в первую очередь целесообразно устранять признаки, наиболее угрожающие его жизни [12]. При оказании первой помощи важно не только знать, как ее оказать, но и уметь правильно обращаться с пострадавшим лицом, чтобы не причинить ему дополнительные травмы.

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), каждые 20 из 100 погибших в результате техносферного происшествия могли быть спасены, если бы первая помощь была им оказана на месте катастрофы. Анализ статистики по дорожно-транспортным авариям показывает, что в среднем до 40% погибших в результате ДТП граждан можно было спасти, если бы окружающие и свидетели происшествия оказали им необходимую помощь до прибытия медиков [13].

В данной работе мы предлагаем следующий универсальный алгоритм оказания первой помощи на месте техносферного происшествия:

– Согласно действующему законодательству граждан Российской Федерации, если он по религиозным, половым, расовым и другим причинам не хочет этого делать, не обязан оказывать первую помощь, если законом не установлено иное, однако он обязан сообщить в специализированные службы о том, что человеку требуется медицинская помощь. Такое сообщение целесообразно проводить после мероприятий по оценке окружающей обстановки и состояния потерпевшего, очевидцем в обязательном порядке должен быть произведен вызов скорой медицинской помощи посредством телефонной и иным видам связи;

– Единый номер вызова службы скорой медицинской помощи на территории Российской Федерации - «103» или «112». До звонка в скорую медицинскую помощь необходимо уточнить место расположения – адрес места происшествия, где находится пострадавший, пути проезда и подъезда с ориентирами, при необходимости, согласовать с оператором кто и где будет встречать оперативные службы [14];

– Необходимо также сообщить количество пострадавших, их пол и возрастные характеристики, краткие обстоятельства произошедшего и информацию о заявителе. Позвонить по номеру экстренных служб можно, в том числе при отрицательном балансе на счету и отсутствии SIM-карты в телефоне [15];

– Первая помощь не обязательно предполагает использование специальных медицинских инструментов, лекарств и оборудования, однако, в медицинской аптечке должны находиться средства для оказания первой помощи [16]. Для оказания первой помощи в аптечку целесообразно включить:

1. Перевязочный материал (стерильные и нестерильные бинты, марля, тампоны, салфетки, бактерицидный пластырь);
2. Ножницы, пинцет, одноразовые перчатки;
3. Эластичный бинт с застежкой на липучке;
4. Жгут;

5. Антисептические средства (спиртовая йодная настойка, брильянтовый зеленый настой);

6. Лекарственные препараты, которые необходимо подбирать, учитывая индивидуальные особенности [17].

Следует помнить, что большинство лекарственных препаратов имеют условия хранения и срок годности, использовать которые при неправильном хранении может быть опасно для жизни пострадавшего лица [18];

– Первая помощь должна завершаться передачей пострадавшего лица для оказания квалифицированной помощи прибывшей бригаде скорой медицинской помощи, которая доставит его в медицинское учреждение [19];

– Прибывшим врачам обязательно необходимо сообщить, какие первоочередные мероприятия первой помощи оказывались пострадавшему. Если в ходе оказания первой помощи использовались лекарства, обязательно сообщить его наименование, так как возможно использование несовместимых лекарственных средств самими медицинскими работниками впоследствии, либо превышение необходимой дозы [20].

Разработанный авторами универсальный алгоритм оказания первой помощи на месте техносферного происшествия представлен на рисунке 1.

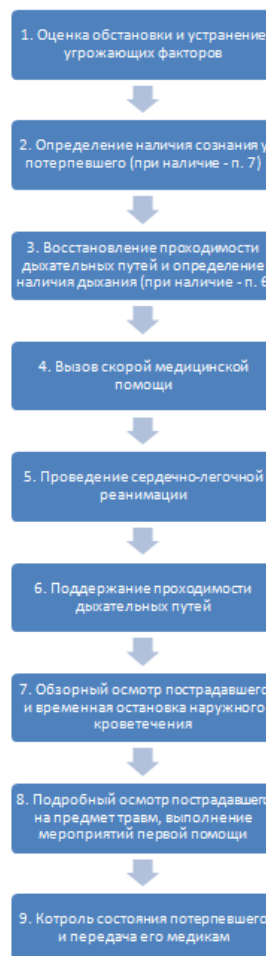


Рисунок 1 – Алгоритм оказания первой помощи на месте техносферного происшествия

Заключение. Авторы данной работы согласны с мнением С.С. Алексанина и В.Ю. Рыбникова [2] о необходимости разработки для системы МЧС России единого, утвержденного ведомственным приказом, алгоритма оказания первой помощи.

В работе представлен разработанный алгоритм и рекомендации оказания первой помощи сотрудниками аварийно-спасательных формирований МЧС России, а также рекомендаций по оснащению имуществом для оказания первой помощи.

Обоснована необходимость принятия данного алгоритма и его утверждения ведомственным приказом МЧС России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Безопасность жизнедеятельности. Первая помощь: учебное пособие для спасателей и очевидцев, оказывающих помощь на месте происшествия. / Под общей ред. О.М. Латышева. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2013, – С. 5.
2. Рекомендации по основам оказания первой помощи пострадавшим в чрезвычайных ситуациях сотрудниками, военнослужащими и работниками ГПС и спасателями аварийно-спасательных формирований и аварийно-спасательных служб МЧС России. Методические рекомендации. / Под редакцией проф. С.С. Алексанина, проф. В.Ю. Рыбникова. – СПб: Политехника-сервис, 2015, – С. 4.
3. Федеральный закон от 21.11.2011 N 323-ФЗ (ред. от 02.07.2021) "Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.10.2021).
4. "Уголовный кодекс Российской Федерации" от 13.06.1996 N 63-ФЗ (ред. от 01.07.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 22.08.2021);
5. Неотложная доврачебная медицинская помощь. И.М. Красильникова, М., 2015. – С. 23.
6. Федеральный закон от 21.12.1994 N 68-ФЗ (ред. от 11.06.2021) "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера".
7. Первая помощь при несчастных случаях и заболеваниях, угрожающих жизни и здоровью человека: учебное пособие. – Ставрополь. Изд-во СтГМУ, – 2017, – С. 11.
8. Основы общего ухода за больными: Учебное пособие. А.Л. Гребнев, М., 2019, С. 157.
9. Первая помощь: учебное пособие для лиц, обязанных и (или) имеющих право оказывать первую помощь. М.: ФГБУ «ЦНИИОИЗ» Минздрава России, 2018 г., – С. 14.
10. Приказ Минздравсоцразвития России от 04.05.2012 N 477н (ред. от 07.11.2012) "Об утверждении перечня состояний, при которых оказывается первая помощь, и перечня мероприятий по оказанию первой помощи" (Зарегистрировано в Минюсте России 16.05.2012 N 24183).
11. Шарабанова И.Ю. Основы медицинских знаний с курсом первой помощи. Учебное пособие. –Иваново: ИВИ ГПС МЧС России. – 2008. – С. 49.
12. Шаховец В.В., Виноградов А.В. Первая медицинская помощь в чрезвычайных ситуациях. – М., 2000, С. 4.
13. «Выживание в автономных условиях» / ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) – М.: ООО «Буки Веди». – 2014 – С. 186.
14. Оказание первой помощи / Памятка под ред. Л.И. Дежурного, М., – 2005 – С. 4.
15. Домашняя книга о первой помощи. Учебное пособие / А.Н. Зернов, М.– 2020. – С. 3.
16. Смирнова Т. П., Кострюкова Н. В., Елизарьев А. Н. Оказание первой помощи в чрезвычайных ситуациях / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ. – 2021. – С. 9.
17. Первая доврачебная медицинская помощь: учебник водителя автотранспортных средств / В.Н. Николенко, Г.А. Блувштейн, Г.М. Карнаухов. – М.: 2007. – С. 37.
18. Инструкция по оказанию первой помощи при несчастных случаях на производстве / В.Г. Бубнов, Н.В. Бубнова, М.: 2015. – С. 67.
19. Алгоритмы оказания первой доврачебной помощи. Учебное пособие. Ангарская Е.Г., – Иркутск., – С. 9.
20. Первая медицинская помощь. Полный справочник. Ю.Ю. Елисеев – М.: Изд-во Эксмо. – 2003. – С. 4

Статья поступила в редакцию 25.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021

УДК 504.064.4, 628.316.12

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0045

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ ОТ СОЛЕЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

© 2021

Демидов Артем Андреевич, соискатель кафедры «Химия и инженерная экология»

Пашинин Валерий Алексеевич, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Химия и инженерная экология»

Российский университет транспорта (МИИТ)

(127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, строение 9, e-mail: info@rut-miit.ru)

Полянская Екатерина Александровна, кандидат биологических наук,

доцент кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: polyanka05@mail.ru)

Панфилова Ирина Сергеевна, преподаватель кафедры «Общей и прикладной физики»

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

(129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, e-mail: 012340@mail.ru)

Зупарова Валентина Владимировна, магистр

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: zuparova_vv@mail.ru)

Аннотация. Статья относится к области техносферной безопасности транспортных систем, в частности к разработке метода по очистке сточных вод на машиностроительных предприятиях, которое является одним из основных источников загрязнения гидросферы. Наиболее эффективно решать проблему очистки сточных вод от солей тяжелых металлов целесообразно на этапе проектирования очистных сооружений, для чего необходимо установить характер загрязнений и выбрать существующие методы очистки. В качестве материалов и методов исследования рассматриваются конструкции электродиализа и методы очистки сточных вод предприятий промышленности. Обосновываются требования к методу очистки сточных вод транспортной промышленности, отсутствуют надежные способы очистки стоков гальванических производств от солей тяжелых металлов, не решена проблема их утилизации из осадков. Разрабатывается способ нанесения покрытий по безотходным технологиям. В статье приведены результаты исследований по обоснованию требований и выбору метода очистки сточных вод предприятий промышленности.

Ключевые слова: мониторинг, очистка сточных вод, соли тяжелых металлов, техносферная безопасность.

PURIFICATION WASTE WATER FROM SALTS HEAVY METALS OF INDUSTRIAL PRODUCTIONS

© 2021

Demidov Artem Andreevich, applicant for the department of chemistry and engineering ecology

Pashinin Valery Alekseevich, doctor of technical sciences, professor,
professor of the department of chemistry and engineering ecology

Russian University of transport

(127994, Russia, Moscow, Obraztsova St., 9 building 9, e-mail: info@rut-miit.ru)

Polyanskova Ekaterina Aleksandrovna, candidate of biological sciences,
associate professor of the department of biotechnology and technosphere security

Penza state University of technology

(440039, Russia, Penza, Baidukova passage/Gagarin street, 1A / 11, e-mail: polyanka05@mail.ru)

Panfilova Irina Sergeevna, lecturer of the department of general and applied physics

National research Moscow State University of civil engineering

(129337, Russia, Moscow, Yaroslavskeye Av., 26, e-mail: 012340@mail.ru)

Zuparova Valentina Vladimirovna, master's student

Penza state technological University

(440039, Russia, Penza, BaydukovProyezd / Gagarin Street, 1a/11, e-mail: zuparova_vv@mail.ru)

Abstract. The article relates to the field of technospheric safety of transport systems, in particular to the development of a method for cleaning waste machine-building enterprises, which are one of the main sources of pollution of the hydrosphere. The most effective solution to the problem of wastewater treatment from salts of heavy metals is advisable at the design stage of treatment facilities, for which it is necessary to establish pollution and select treatment methods. Designs of electrodiagnosis and methods of wastewater treatment at industrial enterprises are considered as materials and research methods. The requirements for the method of purification of waste water from the transport industry are substantiated, there are no reliable methods of purification of wastewater from galvanic production from salts of heavy metals, the problem of their utilization from precipitation has not been solved. Methods for applying coatings using waste-free technologies are being developed. The article presents the results of studies on the substantiation of the requirements and the choice of a method for treating industrial wastewater.

Keywords: monitoring, wastewater treatment, heavy metal salts, technosphere safety.

Введение. Растущий спрос на воду в городских, сельских и промышленных районах создает серьезные экологические и экономические проблемы, а также проблемы в управлении водными ресурсами, связанные с истощением ресурсов и удалением отходов. Некоторые промышленные процессы используют большие объемы воды, таким образом, производя большое количество сточных вод или отработанных потоков с загрязняющими веществами и ценными компонентами. Кроме того, стоки муниципальных очистных сооружений не могут использоваться повторно. Восстановление воды дает возможность устойчивого развития. С другой стороны, это требует разработка и внедрение передовых методов, которые представляют собой технико-экономический вызов.

В этой связи концепция нулевого сброса жидкости (ZLD) направлена на разработку стратегий для создания закрытого материального цикла, тем самым минимизируя жидкие отходы [1-3]. Такой подход – конкретное достижение экономики [4, 5], которая предлагает схемы, основанные на сокращении, альтернативном повторном использовании, переработке и восстановлении материалов в процессах производства распределения и потребления»[6].

Мембранные процессы вызывают большой интерес, и несколько исследований привели к значительным достижениям [7]. Среди них электромембранные технологии разделения ионов селективным транспор-

том через ионообменные мембраны (ИЭМ) под действием электрического поля. Большое разнообразие электромембранных процессов разработано [8–11].

Целью работы является мониторинг и оценка техносферной безопасности транспортных средств, а также очистка сточных вод и удаление отходов.

В частности, электродиализ (ED) производит два потока с разными концентрациями, протекающими в альтернативных отсеках, разделенных альтернативно катионообменными мембранами (CEM) и анионообменными мембранами (AEM). ED может быть рентабельным благодаря свойствам, благоприятным для достижения высокой селективности и извлечения продукта, а также устранением или ограниченной потребностью в химических веществах [8, 9, 11]. Также было установлено несколько установок ED для производства поваренной соли из морской воды методом опреснения. Тем не менее, многие исследования были сосредоточены на применении методов ЭД в (био) химии, пищевой и фармацевтической промышленности [8], включая очистку сточных вод, восстановление химикатов или других ценных продуктов и удаление токсичных компонентов [8, 9].

Что касается очистки сточных вод с помощью ED, исследования показывают экспоненциальный рост в последние годы (рис. 1). Более 75% из 879 научных документов, опубликованных с 1969 г. по настоящее время.

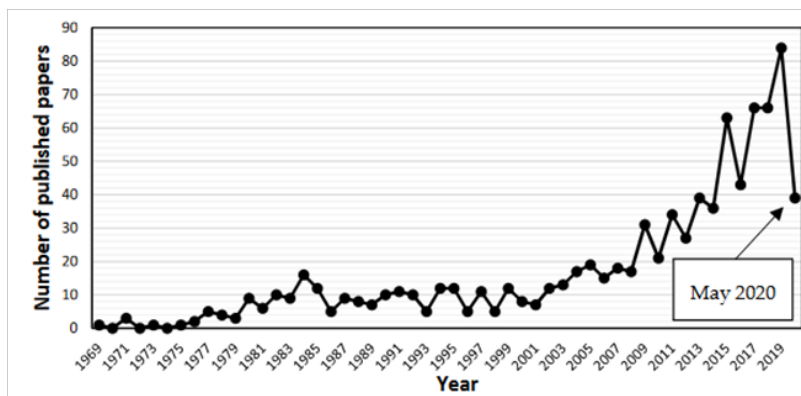


Рисунок 1 – Хронология научных документов, представленных в Scopus с «электродиализом» и «сточными водами»

Материалы и результаты исследования. Многие промышленные стоки (например, от обработки металлов, дубления, обработки целлюлозы и бумаги) имеют сложный состав с загрязнителями и/или ценными компонентами, например, ионами тяжелых металлов, кислотами, органические вещества и т.д. Точно так же очищенные сточные воды из источников городского хозяйства или животноводства содержат: например, питательные вещества. Наконец, рассолы опреснительных заводов могут поваренную соль [12-15].

В 2010 году Стратманн описал принцип ED, условия его работы и конструктивные особенности: уделяя особое внимание опреснению воды и последним достижениям (профилированные мембраны).

Большое разнообразие использования обычных ED и аналогичные технологий обсуждаются путем анали-

за результатов экспериментов, характеристик процесса, сильных сторон и недостатков, а также технико-экономической конкурентоспособности. Последние достижения и новые приложения рассмотрены вместе с примерами среди немногих хорошо зарекомендовавших себя реализаций в реальных условиях.

Основы процесса электродиализа. Принцип работы и конструкция/рабочие особенности процессов ED. На рисунке 2а изображена схема обычного ЭД. Создается совокупность чередующихся AEM и CEM с чередующимися каналами разбавления и концентрата. По крайним сторонам стек ED завершается электродные отсеки. Здесь внешний источник питания устанавливает разность электрических потенциалов, который вызывает окислительно-восстановительные реакции. Постоянный электрический ток течет через

внешнюю цепь, а через батарею - в виде ионного тока с катионами и анионами, мигрирующими к катоду, а также анод соответственно. Блокировка катионов *IEM* приводит к селективному переносу, в результате чего уменьшение / увеличение концентрации соли в каналах разбавления / концентрирования соответственно. Повторяющийся блок в обычном пакете, а именно «пара клеток», включает *AEM*, разбавитель, *CEM* и концентрат. Два входных канала могут отличаться друг от друга. Количество пар ячеек в электродиализаторах колеблется от нескольких или нескольких десятков в лабораторных или экспериментальных масштабах, до сотен в коммерческих стеках для реальных приложений. Активная площадь составляет примерно от 0,01 до 1 м² для одинарной мембраны. Конфигурация «пластина и рама», безусловно, является наиболее распространенной. Сетчатые прокладки (типичная толщина от ~ 300 мкм до ~ 2 мм [6]), снабженные прокладками, помещаются между *IEMs*, чтобы создать подачу отсеков (рис. 2б). Двумя основными конструкциями каналов, заполненных спейсерами, являются листовые и извилистые направления [6]. В первом случае жидкость течет примерно прямо по прямоугольному каналу (рис. 2б). В последнем случае субстанция движется по серпантину. *U*-образные каналы с половинчатыми элементами почти обычное дело в больших установках, как и в схемах извилистых траекторий, в то время как листовые проточные каналы используются чаще для небольших стопок. В мембранах со встроенными профилями не используются сетчатые прокладки [6], но они используются только для теоретических или экспериментальных исследований. Типичный диапазон скорости жидкости составляет 1–10 см/с. Однако на извилистых траекториях скорость может быть увеличена до ~ 50 см/с, чтобы противодействовать более плохому перемешиванию. В большинстве случаев режимы течения устойчивые, но турбулентность может возникать и при более высоких скоростях [6].

Пакетные операции с рециркуляцией раствора типичны для лабораторных исследований, в то время как непрерывные процессы в основном ограничиваются промышленными предприятиями. Операция «подача и отвод» (частичная непрерывная рециркуляция) обычно применяется для контроля за возвратом воды и концентрацией на выходе [8].

Многоступенчатые схемы могут быть разработаны с несколькими конфигурациями (например, с несколькими гидравлическими и/или электрическими ступенями) для достижения требуемых характеристик продукта. *IEM* страдают от явления засорения меньше, чем полупроницаемые мембраны (например, для обратного осмоса). Однако, в зависимости от обрабатываемых растворов, *IEM* могут серьезно ухудшиться, что приведет к более высоким электрическим сопротивлениям и даже к физическим повреждениям. Как взвешенные, так и растворенные твердые вещества (органические и неорганические) могут вызвать загрязнение мембраны. Органические анионы и неорганические соединения часто подразумевают за-

грязнение *AEM* и *CEM* соответственно [9]. Загрязнение вызванное труднорастворимыми осадками солей называется масштабированным. Обратный электродиализ (*EDR*) обычно применяется для уменьшения загрязнения. В результате заряженные компоненты удаляются с поверхности ИЭМ путем миграции в обратном направлении.

Кроме того, методы предварительной обработки сырья и очистки труб на месте (кислотные и/или щелочные растворы) могут предотвратить и удалить обрастание соответственно.

Биполярный мембранный электродиализ (*BMED*) использует как монополярные мембраны, так и биполярные мембраны (*BMs*) для образования кислоты и основания путем диссоциации воды (рис. 2с). *BM* состоит из перекрывающегося катионообменного слоя (*CEL*) и анионообменного слоя (*AEL*), промежуточный слой который тоньше, чем 10 нм [8], способствует диссоциации воды при приложении напряжения (> 0,83 В), тем самым высвобождая H^+ и OH^- [8] со скоростью на шесть (или более) порядков больше, чем в растворе [2]. Это вызвано каталитической ролью функциональных групп и / или катализатора в биполярной области, и сильное электрическое поле (второй эффект Вина) [1]. Механизмы переноса ионов и диссоциации воды все еще изучается с помощью теоретических подходов и численных моделей [1].

Новые техники приготовления на основе методов электроспиннинга производят высокопроизводительные *BM* [3]. На рисунке 2с изображена трехкомпонентная система *BMED*, которая превращает соль в кислоту и основание. Повторяющаяся ячейка состоит из: *AEM*, кислотного отсека, *BM*, основного отсека, *CEM* и разбавленной соли.

Протоны и гидроксильные ионы, генерируемые в биполярной области электрическим полем, пересекают *CEL* и *AEL* и мигрируют в кислотный и основной канал, соответственно, в то время как солевые анионы и катионы (например, Cl^- и Na^+) в солевом канале пересекают монополярные ИЭМ и мигрируют в кислотно-щелочной раствор, соответственно. Тем не менее, были разработаны другие схемы *BMED* с двухкамерным отсеком, повторяющимися единицами, с мембранами *BM-AEM* или *BM-CEM* для производства кислоты или основания (и солевого подщелачивания или подкисления субстанции). Эти конфигурации используются, когда возможно или желательно получить только один раствор с высокой степенью чистоты, применимый в процессах регенерации [4]. Далее *BMED* конфигурации включают тройку ячеек с двумя монополярными наушниками одного типа.

Выходной солевой поток направляется в кислотный или щелочной канал для достижения более высоких скоростей восстановления [5].

Селективная ЭД происходит в электродиализаторах, содержащих одновалентные селективные мембраны (*MBM*), которые могут быть анионными (*MVA*) и / или катионными (*MVC*) и разделять одновалентные и многовалентные ионы. В частности, процесс се-

лективного диализа (*SED*) имеет трехкомпонентную конфигурацию с *MVA* и два обычных *IEM* и фракционирует ионы с помощью трех разных потоков [9]. На рисунке 2d представлен эскиз фракционирования *SED* SO_4^{2-} из Cl^- , содержащегося в исходном растворе. Результаты процесса – обессоливание смеси, обогащение продукта двухвалентными анионами и концентрация рассола с одновалентными ионами. Решетки *ED* могут быть организованы для выполнения метатезиса солей, известного также как «двойное разложение» (обмен катионов и анионов между солями). С парой солей получается:



Электродиализный метатезис (*EDM*) [4] имеет

повторяющийся блок с четырьмя отсеками, который включает в себя два разбавителя и два канала концентрата, все отличные друг от друга, разделенные двумя *AEM* и двумя *CEM* (рис. 2е). Подача (*D1*) содержит соль или смесь солей, в то время как раствор замещения течет по другой канал разбавления (*D2*). Из раствора *D1* анионы переходят в концентрат *C1*, а катионы перемещаются к концентрату *C2*; а из раствора замещения *D2* анионы переходят в концентрат *C2*, и катионы переходят в концентрат *C1*. В результате метаболитов солей между субстанцией и замещением раствора происходит в продуктах-концентрах. В примере на рисунке 2е соли Na^+ и Cl^- образуются внутри отсеков *C1* и *C2* соответственно.

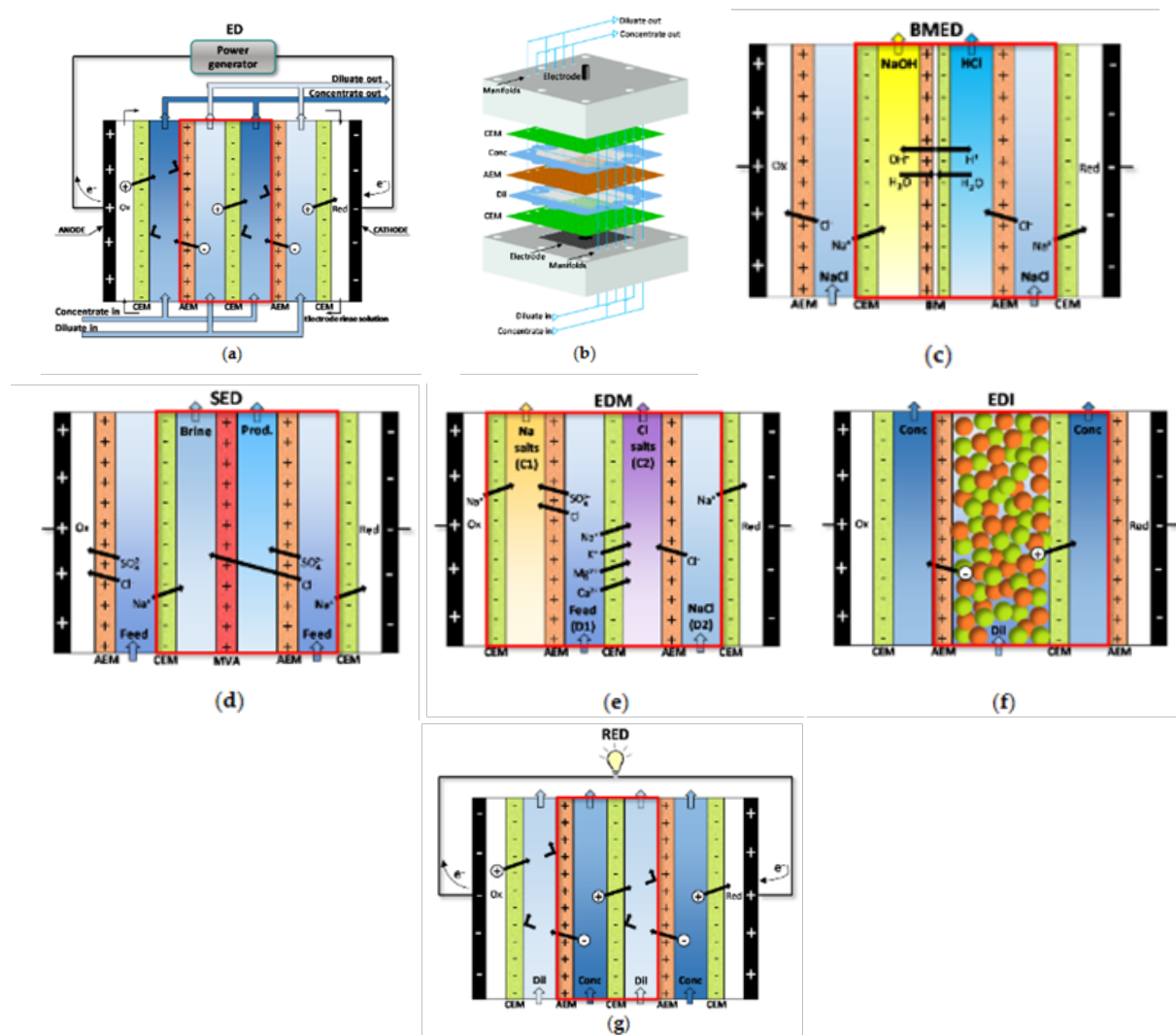


Рисунок 2 – Схема методов ЭД: (а) Обычный электродиализ (ЭД); (б) Стек ЭД лабораторного масштаба с листовой конструкцией (покомпонентное изображение одной пары ячеек с дополнительным *CEM*); (с) Трехкамерный биполярный мембранный электродиализ (БМЭД); (д) Селектродиализ (*SED*) с *MVA* (рисунок относится к фракционирование SO_4^{2-} из Cl^-); (е) Электродиализный метатезис (*EDM*); (ф) Электродионизация (*EDI*) с ионообменными смолами, заполняющими разбавитель; (г) Обратный электродиализ (*KPACHHЫЙ*). Красные прямоугольники обозначают повторяющиеся единицы. Панели (а, б, ж) воспроизведены (адаптированы) с разрешения из [10]

Для повышения эффективности ЭД внутрь канала можно вводить ионообменные смолы (*IXR*).

Гибридизация *ED* и ионного обмена (*IX*) называется электродионизацией (*EDI*) или непрерывной электродионизацией (*CEDI*) [3] (рис. 2f). В установках *EDI*

непрерывно регенерируемые слои *IXR* в разбавитель (иногда также в составе концентрата) вызывает увеличение проводимости и концентрацию уменьшение поляризации. Достигается улучшенный перенос ионов, что позволяет эффективно чистить очень разбав-

ленные растворы благодаря более низкому электрическому сопротивлению и более высоким предельным токам. Возрождение *in situ* *LXR* осуществляется H^+ и / или OH^- из-за диссоциации воды, происходящей на биполярных контактах.

LXRs или между *LXR* и *IEM* [4]. *EDI* больше подходит для производства сверхчистой промышленной воды [4] и для очистки некоторых видов сточных вод, например сточных вод, содержащих ионы металлов [2]. Кроме того, полностью регенерированные *LXR* могут ионизировать и удалять слабоионизированные частицы. (SiO_2 , CO_2 , бор и NH_3).

Сложный транспортный механизм обсуждается уже несколько лет посредством различных моделей [4]. Он включает следующие этапы [7]: диффузия ионов через раствор (этап управления), *LX*, миграция через слой *LXR* и *IEM*, и регенерация *LXR*.

Установки *EDI* имеют несколько конфигураций [2] за счет изменения состава слоя *LXR*. и структура (смешанная, раздельная или многоуровневая), а также количество, размещение и тип наушников, включая использование БМ в качестве мест для диссоциации воды. Модули *EDI* могут быть собраны с несколько повторяющихся единиц между электродами, аналогично пакетам *ED*. Однако другие договоренности всего несколько отсеков (три и более), в том числе и электродные. Среди них некоторые установки используют электролиз воды на электродах для доставки H^+ и OH^- для *LXR*. электрогенерации [5], что значительно отличается от традиционной ЭД.

Производительность в *EDI* может происходить из-за небольшого КПД по току в операциях с высокой диссоциацией воды [9], и от неоднородных распределений потока [4]. Первая проблема может быть решена путем определения оптимального значения приложенного напряжения, что приводит к сосуществованию диссоциации воды и электроконвекции в сверхпредельном режиме, что может повысить эффективность процесса [5]. Последнюю проблему можно решить за счет использования пластин из фиксированной смолы [2].

Обратный электродиализ (*RED*) – процесс, противоположный *ED*. *RED* производит электроэнергию преобразование свободной энергии смешения двух потоков с разной концентрацией соли (энергия градиента солености, или синяя энергия или осмотическая энергия) и осуществляется с помощью пакетов, эквивалентных единицам *ED* [7] (рис. 2г). Раствор с высокой соленостью (концентрат, который фактически разбавляется вдоль канала) и с низкой соленостью раствор (разбавитель, который фактически концентрируется вдоль канала) протекает через два отсека. Самые обычные решения – морская и речная вода, которые обеспечивают максимальная теоретическая плотность энергии ~ 880 кДж/м³ (равные количества обоих растворов). Тем не менее, недавние исследования оценили использование сточных вод. Принцип работы *RED* основан на электрохимическом равновесии исключения иона, который генерирует электри-

ческий потенциал над *IEM*, погруженными между двумя растворами с разной концентрацией (т.е. с разным химическим потенциалом). Сумма всех мембран потенциалов пакета – это его электродвижущая сила. Его можно измерить как разность электрических потенциалов в условиях холостого хода (напряжение холостого хода). Когда цепь замкнута внешней нагрузкой, окислительно-восстановительные реакции в электродных отсеках преобразуют поток внутренних ионов во внешние электроны. Это означает, что напряжение на стеке, которое соответствует напряжению на внешнем электроде. Обратите внимание, что в *RED* (генератор) катод и анод положительный и отрицательный соответственно, т.е. с противоположным зарядом по отношению к ЭД (пользователю). В добавление к электроэнергии, блоки *RED* могут производить H_2 посредством катодного восстановления. Выходная мощность зависит от электродвижущей силы и сопротивления пакета.

Отходы промышленных предприятий могут иметь различный состав. Однако они часто содержат растворенные ионы. Электродиализную очистку промышленных сточных вод можно разделить на: отделение тяжелых ионы металлов; регенерация кислоты / основания, конверсия соли; опреснение.

Разделение ионов тяжелых металлов. Тяжелые металлы – это загрязнители, характеризующиеся токсичностью, канцерогенностью, не подверженностью биологическому разложению, и стойкость в окружающей среде и в живых существах. Среди процессов, предлагаемых для сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов [5], электродиализные методы апробированы на промышленных предприятиях. Стоки от некоторых процессов (металлообработка, кожевенная промышленность и т.д.), предназначенные для повторного использования. Например, *ED* может рекуперировать воду и металлы из отработанных ванн или промывных вод в процессе гальваники, а также различных конфигураций *EDI* предлагают несколько альтернатив *ED* [2]. Несколько исследований были сосредоточены на явлениях переноса путем оценки свойств *IEMs*, эффекта *pH*, образование комплексов и конкуренция ионов, а также путем разработки модифицированных или новых *IEM*. Из них, эксперименты с водными растворами *Ni*, *Cu*, *Zn*, *Cr*, *Fe* и *Pb* были проведены, а также со смесями (например, *Ni*, *Cu* и *Pb*, или *Cu* и *Zn*), что дает важную информацию об основных явлениях и процессах ЭД. Еще один важный аспект – определение оптимальных условий работы [12-15].

С этой целью был принят метод Тагучи. Для экспериментов с ионами металлов, присутствующими в виде отдельных солей или смесей солей [4]. Это мощный метод планирования экспериментов с оптимизацией управляющих параметров и основывается на ортогональных массивах, что сокращает количество тестов. Статистический анализ результатов экспериментов представляет собой дисперсионный анализ, оценка дисперсии ошибок и относительной важности

различных факторов. Кроме того, проверенные модели могут быть приняты для анализа чувствительности и исследований оптимизации [3].

Закключение. Охрана окружающей среды в части предотвращение загрязнения сточных вод от солей тяжелых металлов в целом являются ключевыми задачами, стоящими перед современным обществом.

Использованный в работе метод может позволить получить следующий экономический результат: увеличить выравнивающий эффект действия электролита и плотность осадка, значительно снизить саморазряд электродов; варьируя постепенно содержание ПАВ в электролите, формировать осадки с планируемой системой пор (структурой, извилистостью, диаметром пор); увеличить значительно стабильность разрядных характеристик. Такое усовершенствование процесса приведет к снижению энергозатрат и уменьшения загрязнения сточных вод солями тяжелых металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Демидов А.А., Пашинин В.А., Журавлёва М.А. Безопасность объектов транспортной инфраструктуры в части определения соединений селена//Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта: Межвузовский сборник научных трудов, самостоятельное электронное издание. – Москва, РУТ (МИИТ): РОАТ, 2021 г. – С. 111-117.
2. Дмитриенко Т.Г. Влияние скорости анодного окисления кадмиевого электрода на приэлектродную концентрацию гидроксокомплексов кадмия в растворах КОН различных концентраций//Т.Г. Дмитриенко, Е.А. Хомская, Н.Ф. Бурданова, И.А. Казаринов//Электрохимия. – 1998. – Т.34, № 5. – С. 473-479.
3. Дмитриенко Т.Г. Поверхностная активность гетероароматических соединений пирилевого и хромилевого рядов в реакциях электроосаждения металлов/С.С.Попова, Т.Г.Дмитриенко, Е.В.Ченцова, А.И.Узьякова, С.Ю.Шестопалко//Материалы Всероссийской конференции «Электрохимия и экология, посвященная 80-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, Почетного химика РСФСР, академика РАЕН, д.х.н., профессора Смирнова В.А.» – Новочеркасск. – 2008. – С. 70.
4. Дмитриенко Т.Г. Поверхностная активность селено-содержащих гетеро-ароматических соединений в реакциях катодного выделения – анодного растворения кадмия и его сплавов на медном электроде/ С.С. Попова, Т.Г. Дмитриенко, А.С. Узьякова, Е.В. Ченцова, А.И. Горшков//Материалы 4-ой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экологические проблемы промышленных городов» – Саратов, СГТУ. – 2009. – С. 89 – 91.
5. Дмитриенко Т.Г., Горшков А.И. Соли 9R-Симм.-октагидрохалькогеноксантилия как эффективные ингибиторы и блескообразующие добавки в процессах получения покрытий на медном электроде// Сб. трудов Международной конф. «Пленки и покрытия». – Петербург. – 2011. – С. 202-205.
6. Larchet, C., Nouri, S., Auclair, B., Dammak, L., Nikonenko, V. Application of chronopotentiometry to determine the thickness of diffusion layer adjacent to an ion-exchange membrane under natural convection. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2008, 139, 45–61.
7. Zabolotsky, V.I.; Nikonenko, V.V. Effect of structural membrane inhomogeneity on transport properties. *J. Membr. Sci.* 1993, 79, 181–198.
8. Veerman, J. The Effect of the NaCl Bulk Concentration on the Resistance of Ion Exchange Membranes—Measuring and Modeling. *Energies* 2020, 13, 1946.
9. Porada, S.; van Egmond, W.J.; Post, J.W.; Saakes, M.; Hamelers, H.V.M. Tailoring ion exchange membranes to enable low osmotic water transport and energy efficient electrodialysis. *J. Membr. Sci.* 2018, 552, 22–30.
10. Kamcev, J.; Doherty, C.M.; Lopez, K.P.; Hill, A.J.; Paul, D.R.; Freeman, B.D. Effect of fixed charge group concentration on salt permeability and diffusion coefficients in ion exchange membranes. *J. Membr. Sci.* 2018, 566, 307–316.
11. Ионнообменные мембраны. Перспективы применения полимерных материалов / Э. М. Мовсумзаде, Э. Х. Каримов, Л. Новак [и др.] // Промышленное производство и использование эластомеров. – 2020. – № 3-4. – С. 33-38. – DOI 10.24412/2071-8268-2020-3-4-33-38.
12. Applicability of the modified diatomite for treatment of wastewater containing heavy metals/ D. Boriskov, S. Efremova, N. Komarova [et al.] // E3S Web of Conferences: 2, Online, Virtual, 25–26 февраля 2021 года. – Online, Virtual, 2021. – DOI 10.1051/e3sconf/202124701052.
13. Инженерно-экологическая оценка систем очистки промстоков гальванических производств/Д.Е. Борисков, Н. А. Комарова, А. В. Ажнакина, С.Ю. Ефремова//Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения: Сборник научных трудов по материалам 2-й Всероссийской научно-практической конференции, Саратов, 26–28 октября 2020 года. – Саратов: Общество с ограниченной ответственностью "Амирит", 2020. – С. 30-34.
14. Экологические проблемы гальванических производств / Е. С. Климов, М. Е. Эврюкова, Н. С. Колганова [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 11. – С. 68-69.
15. Atamanova O.V., Tichomirova E.I., Politayeva N.A., Podolsky A.L., Istrashkina M.V., Innovative technologies for industrial wastewater treatment, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 288 (2019)

Статья поступила в редакцию 13.11.2021
Статья принята к публикации 07.12.2021